INVESTIGACION y CIENCIA

¿PUEDE CURARSE LA DIABETES CON TRASPLANTES?

LOS CHUETAS MALLORQUINES

NUEVAS MUESTRAS DEL ARTE PALEOLÍTICO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



Copyright © 1995 Prensa Científica S.A.

HABITANTES DE LAS PROFUNDIDADES MARINAS

SEPTIEMBRE 1995
700 PTAS.



Septiembre de 1995 Número 228

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

150 YEARS OF INNOVATION

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Manuel Puigcerver: *Asteroides y cometas como amenaza para la Tierra*; Víctor Sánchez Margalet: *Tratamiento de la diabetes por trasplante celular*; Joandomènec Ros: *La luz de los fondos marinos* y *De cerca*; Carmen Santamaría y Nicolás García Tapia: *El trabuco*; Juan Pedro Campos: *J. Robert Oppenheimer*; José M.ª Fullola y Manuel Fullola de Hériz: *Las cuevas paleolíticas de Francia*; Jürgen Goicoechea Middelmann: *Los diagramas de Lyapunov*; Luis Bou: *Plásticos conductores* y *Bloc de notas*; J. Vilardell: *Hace...*; A. Garcimartín: *Perfiles*

Ciencia y sociedad:

Juan Pedro Campos, Oriol Pascual

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

Luis Bou y Ana M.ª Rubio

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Bruce H. Robison; Sea Studios

Página	Fuente
5-12	Le Scienze
14-15	Tomo Narashima
16-17	Michael Goodman (*abajo*); Lelio Orci, Centro Médico Universitario, Génova (*superior derecha*)
18	Tomo Narashima
19	Paul E. Lacy
20	Will van Overbeek
22-23	Roberto Osti
24-25	Bruce H. Robison; Sea Studios (medusa, gusano pelágico, ctenóforo); Kim Reisenbichler (*Vampyroteuthis*)
26-27	Bruce H. Robison; Instituto de Investigación del Acuario de la Bahía de Monterrey (*inf. dcha.*)
28	Marsh Youngbluth, Institución Oceanográfica Harbor Branch (*foto*); Carey Ballard (*gráfica*)
29	Instituto de Investigación del Acuario de la Bahía de Monterrey
43	Sociedad Arqueológica Luliana
44-48	Misericòrdia Ramon, Antònia Picornell y José A. Castro
50-51	Guglielmo Galvin
52-53	Jared Schneidman Design
54	Cortesía de Paul E. Chevedden (*fotografía*); Ian Worpole. Fuente: K.A.C. Creswell (*mapa*) (*arriba*); Museo del Palacio de Topkapi, Estambul (*abajo*)
55	Estado de la Baja Sajonia y Biblioteca Universitaria, Göttingen
57	© Arnold Newman
58-59	(*de izquierda a derecha*) AP/Wide World Photos; Universidad de Cambridge; Archivo Bettman; Universidad de Cambridge; Archivos CIT; UPI/Bettman; Gerd Binnig y Heinrich Rohrer
60	(*de izquierda a derecha*) AP/Wide World Photos; Archivos CIT; AP/Wide World Photos
62-63	Jean-Clottes-Sygma
64	Documents Pour la Science
65	J. Clottes-Sygma (*arriba*); A. Chêné-Centro Camille Jullian (*abajo*)
66	A. Chêné-Centro Camille Jullian (*arriba*); Jean Vertu (*centro izda.*); Michel Lorblanchet (*calco, centro dcha.*) y J. Vertu (*abajo*)
67	A. Chêné-C. Camille Jullian (*izquierda*) y J. Vertu (*derecha*)
68	Jean Clottes
78	Charles O'Rear
80-82	Karl Gude
83	Charles O'Rear



La exploración directa de las zonas profundas de los mares permite conocer mejor la vida que allí se desarrolla. A niveles donde ya no alcanzan los rayos solares abundan las criaturas frágiles y gelatinosas, pero no faltan las de aspecto amenazador, como este pez, *Anaplogaster cornuta*, cuyo nombre vulgar parece el más adecuado: *Colmillos*. (*Véase* "La luz de los fondos marinos", por Bruce H. Robison, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Marguerite Holloway, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Associate Editor*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler; Philip Morrison, *Book Editor*; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; Corey S. Powell; David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam; Glenn Zorpette
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens
DIRECTOR, ELECTRONIC PUBLISHING Martin Paul

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.600	15.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA

Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



Copyright © 1995 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

Copyright © 1995 Prensa Científica S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Filmación: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A., Avila, 112-114 4ª pl. - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A., Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «La American Telephone and Telegraph Company ha elaborado unos planes detallados de una red de estaciones repetidoras de radio que cubriría todo el país, de tal modo que los automovilistas equipados con radio bidireccional pudieran hacer llamadas desde sus vehículos en movimiento, y desde cualquier lugar, a los abonados normales a la red telefónica. Cuando al final de la guerra se reanuden los servicios telefónicos mundiales, una persona que condujese su automóvil por una encantadora carretera rural, digamos de Minnesota, podría charlar con un amigo suyo en Java sin ni siquiera parar el vehículo, suponiendo, claro está, que sus cuentas con la compañía telefónica se hallen en orden.»

«Acaba de anunciarse un nuevo instrumento para escribir que coloca la tinta sobre la superficie por rodadura y la deja seca, en vez de distribuirla líquida, como hacen las plumas fuente. Emplea un rodamiento de bolas en miniatura como punta y tinta viscosa. Se afirma que esta pluma no pierde ni gotea y que es imposible extraerle la tinta sacudiéndola.»

«En una reciente alocución, el doctor P. W. Selwood, de la Northwestern University, afirmó que los estudios magnéticos, una de las herramientas de los químicos, están descubriendo hechos nuevos acerca de los catalizadores, los cruciales "casamenteros" de tantas reacciones químicas. "De la naturaleza y extensión de la atracción y repulsión magnéticas pueden extraerse conclusiones relativas a la estructura de estos compuestos químicos, los electrones contenidos en las moléculas, la presencia de impurezas y el mecanismo de determinados cambios químicos y físicos."»

«Doscientos mil nuevos automóviles de turismo a fines de 1945. Cuatrocientos mil más en el primer trimestre de 1946. Estas son las predicciones de última hora. La entrada en producción de nuevos vehículos hace que el propietario medio de un automóvil tenga una nueva actitud hacia la máquina que le ha acompañado a lo largo de los últimos años. De pronto se da cuenta de su aspecto lastimoso, de sus rarezas, de sus deficiencias. De repente, necesita un auto nuevo. ¿Y cómo será ese auto nuevo? Es posible que algún día las carrocerías de los automóviles sean en su totalidad de algún tipo de plástico.»

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Acaso uno de los más extraños pavimentos nunca tendidos sea el que acaba de terminarse en Chino (California). Esta nueva acera, de más de trescientos metros de largo, está hecha en su mayor parte de melaza; si el pavimento alcanza el éxito que se proclama, podría indicarles a los plantadores de caña de azúcar del sur un camino para deshacerse con beneficios de los millones de litros de melaza inútil que tienen en sus manos. La melaza se mezcla simplemente con arena de una cierta clase hasta adquirir la consistencia aproximada del asfalto y luego se extiende del mismo modo que un pavimento de asfalto. La composición se seca rápidamente, volviéndose bastante dura, cualidad que retiene.»

«Que el vidrio es poroso para las moléculas de un peso y volumen inferiores a ciertos valores lo han demostrado experimentos electrolíticos recientes. Por un recipiente que contenía una amalgama de sodio separada de mercurio por un tabique de vidrio se hizo pasar una corriente eléctrica. Al cabo de un rato se vio que la amalgama había perdido una cierta cantidad de peso, mientras que esa misma cantidad la había ganado el mercurio. Pero no fue posible que el potasio, cuyos peso atómico y volumen son mayores, traspasase el vidrio.»

«Las cataratas del Niágara serán posiblemente el emplazamiento de una factoría de hombres eléctricos; no hipnotizadores ni svengalis, sino autómatas que funcionarán con electricidad. En una planta de Tonawanda ya se ha construido uno; el hombre, vestido con el uniforme de la revolución americana, arrastra por las calles una pesada carretilla con bastante soltura. Los futuros modelos de hombres eléctricos estarán accionados por baterías de acumuladores y tendrán un fonógrafo. El fonógrafo puede proclamar las virtudes de algún específico o emplearse en campañas políticas.»

«En la ciudad de Boston se hallan en curso las obras de construcción de un sistema de ferrocarril subterráneo, ideado para contrarrestar la superpoblación y hacer frente adecuadamente al tráfico. La idea es que en un túnel dedicado al ferrocarril exclusivamente, y sin ninguna de las interferencias que suponen vehículos y peatones, los coches podrán cumplir los horarios, pues podrán funcionar a velocidades mucho mayores que las permitidas por una calle concurrida.»

Ferrocarril subterráneo de Boston

Asteroides y cometas como amenaza para la Tierra

Estos cuerpos celestes pasan muchas veces relativamente cerca de la Tierra sin constituir ningún peligro. La humanidad se prepara, sin embargo, para someterlos a estrecha vigilancia

Andrea Carusi

La espectacular y reciente colisión del cometa P/Shoemaker-Levy 9 (la P quiere decir periódico), o más bien de sus fragmentos, con Júpiter ha llevado a las primeras páginas de todos los medios de información un fenómeno bien conocido, pero al que hasta ahora no se había prestado gran atención: los cuerpos celestes chocan a veces entre sí; en algunos casos lo hacen con gran violencia y liberando energía muy destructiva.

Se sabe desde hace mucho tiempo que los cráteres lunares son consecuencia de impactos y también se sabe evaluar la energía desarrollada en estas colisiones. Las misiones espaciales de los últimos treinta años han puesto además de manifiesto que todos los cuerpos del sistema solar que tienen una superficie sólida presentan cráteres de impacto. Ha quedado, pues, claro que la formación de estos cráteres ha sido —y es todavía— un fenómeno ubicuo en nuestro sistema planetario, de cuyas consecuencias ningún planeta, ni siquiera la Tierra, ha escapado.

Son pocos los cráteres de este origen que se han identificado con certeza en nuestro planeta. Las acciones combinadas de los movimientos tectónicos, de la erosión producida por los agentes atmosféricos y de las transformaciones causadas por los seres vivos han borrado totalmente las trazas de los impactos más antiguos o de menores dimensiones, de modo que hoy día no son reconocibles más que alrededor de un centenar de cráteres, casi todos de edad inferior a 200 millones de años.

Los cráteres que presentan las superficies planetarias se originan por los choques de objetos errantes, en general de dimensiones no superiores a las de una montaña terrestre. Por sus características físicas, y por tradición, estos cuerpos se subdividen en dos grandes categorías: los asteroides y los cometas. A los que pudieran contribuir a la producción de cráteres en la Tierra se les denomina colectivamente *Near-Earth Objects* (NEO), u objetos próximos a la Tierra. Sólo en los últimos años se ha planteado la cuestión de hasta qué punto resulten peligrosos; un vago temor inicial está siendo sustituido ahora por la idea de que es necesario indagar más a fondo la cuestión y se está organizando, tanto científica como políticamente, la creación de un sistema de vigilancia.

En este artículo se tratará de ilustrar entrambos aspectos del estudio en curso, con el convencimiento de que es justo que el público sepa en qué dirección nos estamos moviendo. El lector, no obstante, se dará cuenta de que es asunto espinoso, no tanto por sus aspectos científicos cuanto por los políticos.

Tanto los asteroides como los cometas representan los últimos restos de una población extinta de pequeños objetos que, en los inicios de la historia del sistema solar, se agregaron para formar los actuales planetas y, en parte, sus satélites. No obstante, estas dos poblaciones poseen características físicas y dinámicas muy diferentes, de modo que resulta útil distinguirlos, aunque no sea más que por claridad.

Los asteroides son objetos básicamente rocosos. No conocemos todavía los detalles de sus características geoquímicas y mineralógicas, pero sabemos lo bastante para poder distinguir entre los que tienen un elevado contenido metálico, principalmente hierro y níquel, otros que están compuestos sobre todo de silicatos, como las rocas terrestres, y los objetos de compuestos carbonados. Estas tres grandes categorías no están netamente separadas y a los objetos digamos "mixtos" se agregan también cuerpos de composición más rara o simplemente desconocida. La mayoría de los asteroides gira en torno al Sol en la zona del espacio comprendida entre la órbita de Marte y la de Júpiter. Si usamos las unidades astronómicas (cada una de las cuales vale aproximadamente 150 millones de kilómetros) para medir distancias, esta zona, el "cinturón principal", abarca desde las 2 a las 3,5 unidades astronómicas. Se conocen algunas decenas de millares de asteroides del cinturón principal, pero sólo una fracción de ellos (unos 6000) se ha observado con suficiente exactitud para determinarles una órbita fidedigna (y por tanto previsible).

A diferencia de los asteroides, los cometas son objetos muy frágiles, compuestos principalmente de hielos de diversa naturaleza, en los que predomina el agua. La diferencia química procede, con toda probabilidad, del distinto lugar de origen: mientras que los asteroides se formaron en las partes internas del sistema solar, donde los compuestos más ligeros eran escasos, los cometas se originaron en las zonas externas, donde ahora se ha-

ANDREA CARUSI se doctoró en física en Roma en 1970 y ha trabajado siempre para el Instituto de Astrofísica Espacial, del Centro Nacional de Investigación italiano, ocupándose de problemas de ciencias planetarias y especialmente de la dinámica de los cuerpos menores del sistema solar. De 1991 a 1994 presidió la Comisión 20 de la Unión Astronómica Internacional ("Posición y movimiento de los asteroides, cometas y satélites"); además es presidente del "Grupo de trabajo sobre objetos próximos a la Tierra" de la Unión Astronómica Internacional desde 1991.

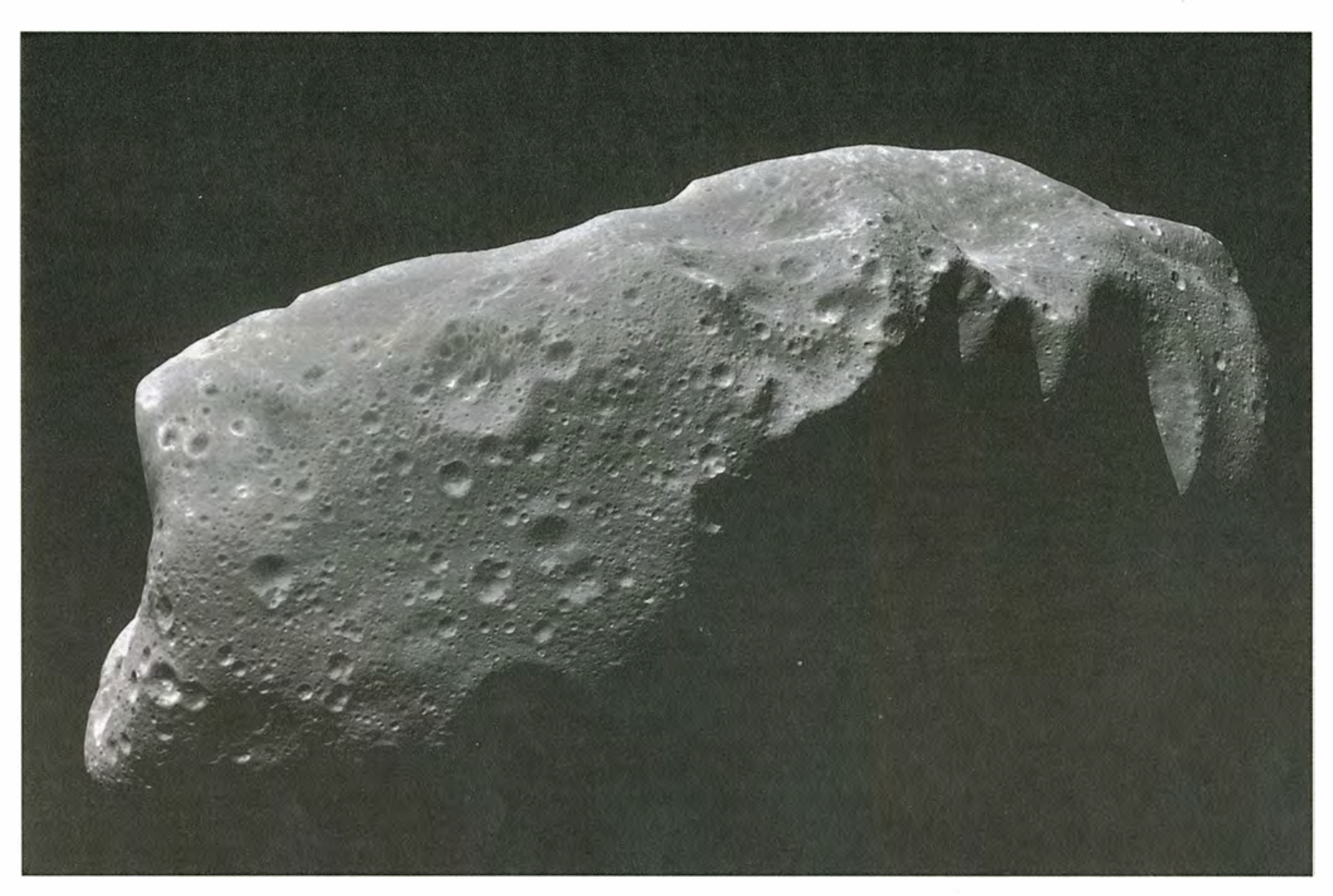


1. LOS FRAGMENTOS del cometa P/Shoemaker-Levy 9, que en julio de 1994 entraron en colisión con Júpiter, parecen un largo collar (*arriba*). En la fotografía a la derecha, el "ojo de buey" indica el punto de impacto del fragmento G. El anillo externo, en forma de cuarto creciente, es más ancho que la Tierra. El fragmento D originó la mancha más pequeña situada la izquierda.

llan los cuatro planetas gigantes Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. En estas regiones había abundancia de compuestos ligeros y de gas, como por lo demás demuestra la propia composición de los planetas exteriores.

La dinámica de los cometas es muy complicada y muy diferente de la de los asteroides. Algunos cometas, los llamados "de período corto", giran alrededor del Sol en la zona donde se encuentran los planetas (la "región planetaria", a menos de 40 unidades astronómicas del Sol) y muchas veces se aproximan a ellos, lo que suele modificar las órbitas de los primeros. A esto se debe que sean los objetos más móviles del sistema solar, en el sentido de que pueden desplazarse con facilidad de una zona a otra. Si se conocen sus órbitas, no es difícil prever su retorno. Otros cometas tienen períodos de revolución muy largos, del orden de millones de años, no siendo observables más que una sola vez, por lo que su aparición resulta casual e imprevisible. Es probable que exista una enorme cantidad de cometas más allá de la región planetaria, donde ni siquiera los más potentes telescopios permiten verlos.

Como acabamos de decir, la interacción gravitatoria con otros planetas, sobre todo con Júpiter, puede hacer que un asteroide o un cometa vean modificada su órbita de manera que se aproxime más a la Tierra. Tal movilidad hace que la población de estos objetos sea fluctuante, por lo que resulta difícil estimar su número y evaluar la probabilidad de que uno de ellos venga a incidir sobre nosotros, lo que constituye uno de los mayores escollos de la organización de su vigilancia.



2. EL ASTEROIDE (243) IDA, fotografiado recientemente por la sonda estadounidense *Galileo*. Mide 50 kilómetros a lo largo de su eje mayor y tiene un pequeño satélite (Dactyl), que no aparece en la fotografía.

Pese a todo, algo sabemos. La ayuda más importante nos la proporciona el estudio de las superficies de los restantes planetas y de sus satélites, sobre todo de la Luna. Nuestro satélite conserva una memoria casi intacta de las colisiones experimentadas por su superficie durante los 4600 millones de años de su historia. El estudio de la distribución y de la edad de los cráteres lunares en función de su dimensión proporciona un método eficaz para intuir cómo sería la Tierra antes de que los fenómenos erosivos borrasen las trazas.

Naturalmente hay que corregir las distribuciones así obtenidas conforme a la diferente masa de los dos cuerpos y a la distinta energía de los proyectiles, aunque no siempre sea fácil. La masa de la Tierra es ochenta y una veces mayor que la de la Luna, lo que significa que su "esfera de influencia" es mayor y, por tanto, capta más objetos que ésta. Las velocidades de colisión son también mayores, al ser más intenso el campo gravitatorio, siendo también superiores las energías desarrolladas en un impacto.

Consideraciones de este tipo nos permiten calcular el número de objetos de un tamaño dado que se encuentran en los alrededores de la Tierra (*véase la ilustración 4*). Se llega así a la conclusión de que existen unos 2000 cuerpos celestes de más de un kilómetro situados en órbitas que podrían llevarlos a chocar con la Tierra. Esto no significa que tal cosa suceda, y menos todavía que se produzca en plazo breve, sino sólo que existe la *posibilidad dinámica* de que pase. De estos presuntos objetos peligrosos conocemos poco más de cien; sus órbitas suelen estar tan mal determinadas que no permiten previsión alguna a medio plazo (digamos en los próximos 200 años).

Las mejores estimas de la probabilidad de impacto con la Tierra, basadas en evaluaciones razonables de la abundancia, se consignan en el gráfico de la ilustración 5. Enseguida consideraremos los efectos que tales colisiones tendrían sobre el ecosistema terrestre, según fuese el tamaño del proyectil; es oportuno, sin embargo, hacer notar desde ahora que los sucesos "catastróficos" son, por fortuna para nosotros, extremadamente raros, pero no hasta el punto de que podamos permitirnos ignorarlos.

Se ha dicho que los choques entre cuerpos celestes son un fenómeno corriente en el sistema solar. Conviene observar que los astrónomos entienden por "cuerpo celeste" cualquier objeto que se encuentre en órbita alrededor del Sol, con independencia de sus dimensiones. La mayoría de los cuerpos celestes así entendidos pertenecen a la clase de los meteoritos, fragmentos de asteroides y cometas, que pocas veces superan unos cuantos metros de diámetro.

Todos los días, varias toneladas de material cósmico llegan a la superficie terrestre bajo la forma de una finísima lluvia de partículas de menos de un milímetro, que penetran de incógnito en la atmósfera. De vez en cuando, la Tierra cruza la órbita de un cometa y caen sobre ella los detritos que la continua disgregación del núcleo del cometa deja tras él. Se observa entonces un intenso bombardeo de partículas un poco más grandes (de hasta de un centímetro): son las conocidísimas "lluvias de estrellas". Al atravesar la atmósfera, dichas partículas se calientan y se funden, emitiendo una luz tan intensa como efímera. Hay muchos de estos "enjambres" meteoríticos asociados a cometas, causantes de tan fascinante fenómeno; por ejemplo, el cometa P/Swift-Tuttle es el genera-

dor de las partículas que caen alrededor del 10 de agosto.

Mucho más raramente logra alcanzar el suelo un cuerpo de dimensiones moderadas (de algunas decenas de centímetros) sin consumirse completamente por el rozamiento con la atmósfera: se trata de un meteorito. Nuestros museos están llenos de ellos, preciosísimos mensajeros celestes que nos informan sobre la química y la mineralogía de los asteroides (pues ninguno de los hallados hasta ahora tiene un indiscutible origen cometario). Es muy raro que la caída de un meteorito lesione a las personas, pero se conocen muchos casos de viviendas, automóviles y hasta buzones de correos dañados.

A medida que las dimensiones del proyectil aumentan, crece también la importancia de los efectos producidos. Podemos intentar ordenarlos en una escala, como han propuesto Clark Chapman, del Instituto de Ciencias Planetarias de Tucson, Arizona, y David Morrison, del Centro de Investigación Ames de la NASA en Moffet Field. Esta escala tiene cuatro grados. El primero está representado por los objetos que pocas veces llegan al suelo y, en todo caso, no provocan daños apreciables. Son sucesos que se están produciendo continuamente sin que nos demos cuenta, originados por objetos de dimensiones inferiores a 10 metros.

El segundo nivel corresponde a la caída de objetos de entre 10 y 100 metros. Son fenómenos mucho más raros que los precedentes y su frecuencia media estimada es de uno por siglo. Los cuerpos de estas dimensiones ya comienzan a preocupar. Imaginemos, en efecto, que el proyectil sea un fragmento de cometa o de asteroide rocoso: al atravesar la atmósfera, quedará sometido a una fortísima presión sobre la cara anterior (recordemos que su velocidad ronda los 20 kilómetros por segundo) y a una depresión igualmente fuerte sobre la cara posterior. El resultado de este esfuerzo es que se romperá en pedazos, aplastándose como un buñuelo hasta explotar, normalmente antes de llegar al suelo. La explosión será muy violenta, comparable a la de una bomba nuclear de 10 megatones si el objeto tiene una cincuentena de metros. Generará por tanto una intensa onda de choque atmosférica, que incidirá violentamente sobre el suelo en un radio de muchos kilómetros.

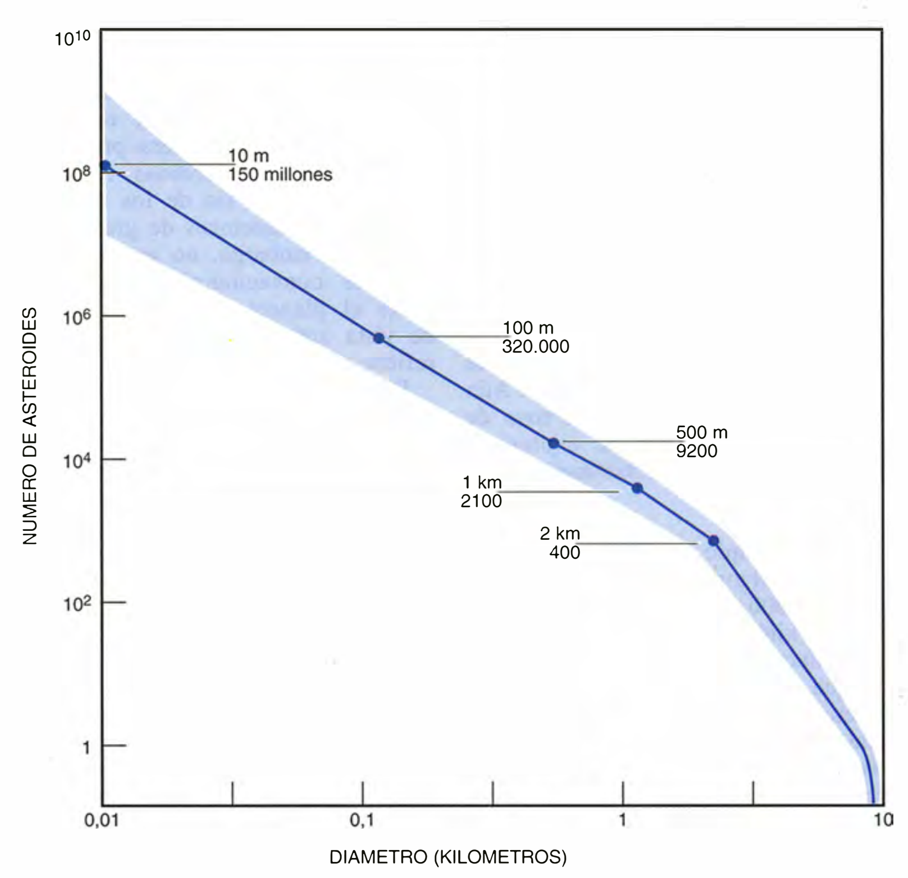
Un ejemplo famoso y muy estudiado de este tipo de episodios lo constituye la explosión acaecida en la región de Tunguska, en Siberia, en junio de 1908. Se cree que el proyectil fue un asteroide rocoso de unos treinta metros de diámetro. Aún hoy es posible reconocer la zona de árboles abatidos por la explosión, que ocupa unos 2000 kilómetros cuadrados.

Otro ejemplo es el Meteor Crater de Arizona, que se originó hace unos 10.000 años. Tiene un diámetro de 1,5 kilómetros, pero el área a la que afectó el fenómeno —es decir, la que sufrió un terremoto de cierta intensidad y la deposición del material excavado por el proyectil— se extiende en todas las direcciones por muchas decenas de kilómetros. El proyectil era, en este caso, un fragmento de asteroide metálico, de no más de unas cuantas decenas de metros. Se conocen algunos otros casos parecidos, pero ninguno de ellos ha producido, en época histórica, daños tales que hayan merecido mención en los anales. Esto no impide que un suceso como el de Tunguska, si hubiese tenido lugar en una zona muy poblada (como sería casi cualquier parte de Europa), hubiera producido devastaciones y pérdidas humanas comparables con las de los terremotos y las inundaciones de gran intensidad. Sin embargo, no se puede hablar de consecuencias "globales" sobre el planeta, ni desde el punto de vista ambiental ni por lo que se refiere al clima.

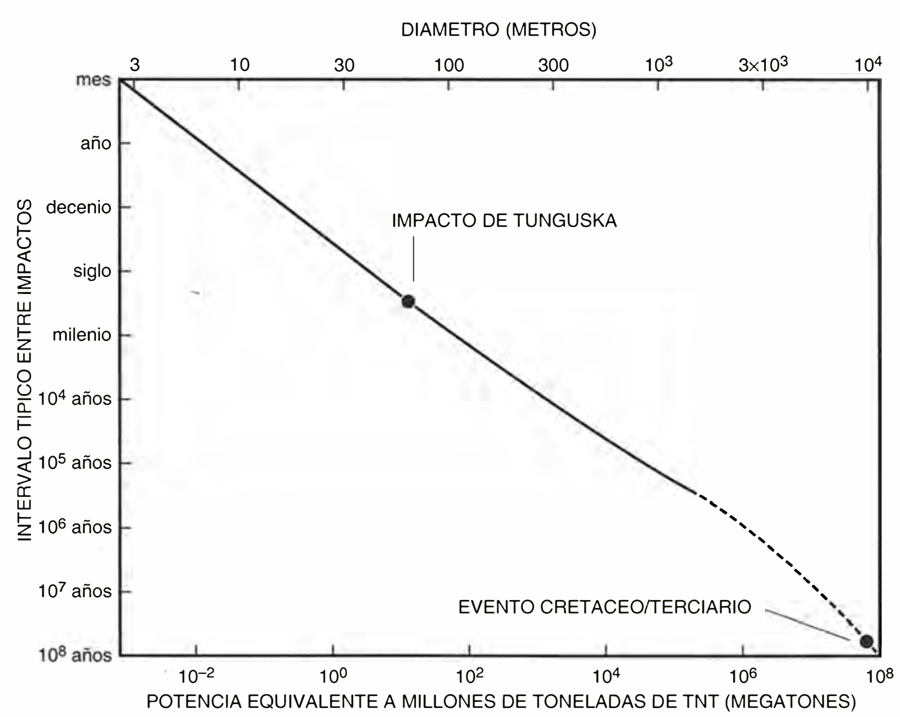
Debe, no obstante, considerarse la posibilidad de que el proyectil caiga en el mar; de hecho, ésta es la hipótesis más probable, dada la extensión de los océanos respecto a la tierra firme. Un impacto sobre el océano no causaría grave preocupación tratándose de objetos pequeños, digamos de hasta un centenar de metros. Pero objetos mayores podrían provocar un maremoto, o mejor un *tsunami*, de consecuencias considerables. El choque generaría una onda anómala, que se propagaría en todas direcciones con gran velocidad y poca atenuación; en la vecindad de las costas, su amplitud aumentaría hasta más de 40 veces, abatiéndose por tanto sobre la tierra firme con gran violencia. Se calcula que un objeto de 200 metros —que desarrollaría una potencia próxima a 5000 megatones— daría origen en mar abierto



3. EL NUCLEO DEL COMETA P/Halley, según una fotografía obtenida en 1986 por la sonda europea *Giotto* desde una distancia de algunos centenares de kilómetros. Las zonas brillantes, visibles en la parte izquierda del núcleo (que mide alrededor de 15 kilómetros según el eje mayor), son producidas por las emisiones de gas y polvo que forman la cabellera y la cola del cometa.



4. NUMERO DE OBJETOS PROXIMOS a la Tierra (*Near-Earth Objects*, NEO) representado en función de sus dimensiones. La anchura de la banda que flanquea la curva indica la incertidumbre de los datos.



5. FRECUENCIA DE LOS CHOQUES entre la Tierra y los cuerpos celestes errantes, representada en función de las dimensiones de éstos y, en consecuencia, de la potencia explosiva resultante. La potencia se expresa aquí en megatones (millones de toneladas equivalentes de TNT), la misma unidad usada para las armas nucleares. El tramo punteado de la curva está afectado de considerable incertidumbre.

a olas de más de tres metros de altura, que alcanzarían los 100 metros en las costas. Pueden imaginarse fácilmente las consecuencias previsibles sobre cualquier asentamiento humano, siendo de tener en cuenta que gran parte de la población mundial vive en zonas costeras.

El tercer y cuarto grados de nuestra escala se refieren a fenómenos cuyas consecuencias abarcarían a todo el planeta. Es importante esta distinción, porque precisamente sobre ella se basa la estrategia de defensa que se está poniendo a punto. Llamaremos global a un acontecimiento cuando no haya región alguna de la Tierra que no se vea afectada por las consecuencias. Tales consecuencias serían sobre todo de naturaleza climática, aunque también habría vastas regiones que sufrirían directamente la violencia de la explosión.

Se admite, de modo bastante arbitrario, que la frontera entre el segundo y el tercer nivel de gravedad la constituye un suceso de una potencia explosiva del orden del millón de megatones. Recordemos que los artefactos explosivos más potentes que existen sobre la Tierra no superan los 100 megatones; estamos, pues, hablando de una explosión comparable a la de 10.000 bombas de las más potentes disponibles. La comparación no es casual, pues suelen equipararse los efectos de un tal suceso con los que se producirían si explotaran a la vez todas las bombas atómicas actualmente existentes en los arsenales militares.

A comienzos de los años ochenta se habló mucho del "invierno nuclear", entendiendo por tal el conjunto de efectos que causaría una catástrofe nuclear. Los sucesos del tercer grado de la escala tendrían las mismas consecuencias. Entre las más vistosas se encuentra la introducción en las capas superiores de la atmósfera de ingentes cantidades de polvo y de cenizas (consecuencia de los incendios); ambos son muy opacos, por lo que bloquearían casi por completo la radiación solar durante muchos meses. En la práctica se produciría un largo período de oscuridad casi absoluta, durante el cual algunas funciones fundamentales de los organismos vivos, como la síntesis de la clorofila o la caza resultarían imposibles. Es bien sabido que el equilibrio de un ecosistema se apoya sobre la interacción mutua entre las especies vivientes, la llamada "cadena trófica", cuya rotura o distorsión origina consecuencias graves y difícilmente previsibles. La disminución de

la cantidad de luz sobre el suelo se traduciría pronto en un brusco descenso de la temperatura, que a su vez facilitaría la pérdida de las cosechas, al menos en el hemisferio que en aquel momento se hallase en período estival. La serie de consecuencias puede continuarse fácilmente con una falta de alimentos generalizada, carestía y epidemias consiguientes. No son muchas las naciones de la Tierra que pudieran hacer frente a una catástrofe de estas proporciones.

El impacto de objetos de uno a dos kilómetros de diámetro equivaldría a una explosión de un millón de megatones. Supondremos que un kilómetro sea el valor "crítico" del tamaño de un proyectil: si fuese inferior, se producirían fenómenos locales (dolorosos, pero no extraordinarios); por encima de él se tendrían los efectos "catastróficos". Los acontecimientos catastróficos exponen a grandísimo riesgo todas las estructuras de la convivencia humana (sanitarias, políticas y económicas).

No habría un claro límite superior para las dimensiones de la catástrofe si no fuera porque hasta la fecha no se conocen objetos de más de ocho kilómetros (los asteroides 1627 Ivar y 1580 Betulia). El impacto de un objeto de este tamaño produciría un suceso del cuarto grado en la escala de gravedad. Es difícil imaginar las consecuencias de un choque de este género, sobre todo porque nos estamos afanando por mantener el discurso lejos del sensacionalismo fácil. Por desgracia, no disponemos de demasiado margen para dorar la píldora: cosas así pueden suceder, ya han sucedido en el pasado y podrían ocurrir en el futuro; mejor dicho, a la larga acabarán ocurriendo.

Un objeto de 10 kilómetros de diámetro, lanzado a una velocidad de 20 kilómetros por segundo, no "vería" la atmósfera. Emplearía uno o dos segundos en atravesarla, dejando un tubo de vacío tras de sí. Explotaría, por tanto, en el suelo, con una potencia estimada de mil millones de megatones, produciendo un cráter de, al menos, 100 kilómetros de diámetro. Los efectos serían dramáticos por doquier: el material incandescente extraído por el choque sería lanzado en órbita balística y volvería a caer sobre todo el planeta, desencadenando incendios y destrucciones. Continentes enteros se incendiarían, lanzando a la atmósfera tal cantidad de cenizas y de hollín que, junto con la polvareda, impedirían completamente la llegada de luz al suelo al menos durante un par de años. La temperatura bajaría en todas partes de diez a veinte grados, produciéndose heladas en pleno verano. La zona receptora del impacto sería sacudida por un terremoto extraordinariamente violento, que se notaría de manera catastrófica hasta algunos centenares de kilómetros de distancia. Por otra parte, la inmisión de ingentes cantidades de carbono en la atmósfera, a causa de los incendios, produciría pirotoxinas, productos de gran toxicidad, por no hablar de las lluvias ácidas. Especialmente grave sería la situación en los estratos superiores del océano, donde viven organismos (el fitoplancton) que desarrollan una función fundamental en las cadenas tróficas marinas.

A este período inicial de oscuridad y de frío le sucedería otro larguísimo (hay quien habla de muchos millares de años) durante el cual el dióxido de carbono de la atmósfera provocaría, por efecto de invernadero, una gran subida de la temperatura. Sería un clima tórrido, con temperaturas muy elevadas, sobre todo en los primeros centenares de metros de las aguas marinas.

Tenemos ahora pruebas de que algo por el estilo aconteció en la Tierra hace 65 millones de años. En todo el mundo se han descubierto estratos rocosos de esa fecha con un contenido anómalo de iridio, elemento muy escaso en la corteza terrestre, pero abundante (en proporción) en



6. INCENDIO provocado por la caída de un bólido en Chaux, Francia, el 10 de enero de 1846, según dibujo de un testigo.



7. EN JUNIO DE 1908, en la zona de Tunguska, en Siberia, explotó un cuerpo, probablemente rocoso, de una treintena de metros de diámetro. La fotografía, tomada por la expedición Kulik casi veinte años después, muestra una zona de árboles abatidos por la explosión. El área afectada abarca una superficie de más de 2000 kilómetros cuadrados.

los asteroides. Esta fue la primera señal, identificada por Luis y Walter Alvarez (padre e hijo), de que un objeto de grandes dimensiones debió de caer sobre la Tierra por aquella época. Se ha encontrado hace poco la traza fósil de este suceso: el cráter semisumergido de Chicxulub, en la península de Yucatán, en México. El cráter tiene un diámetro de unos 200 kilómetros y podría haber sido originado por un objeto de unos 10 kilómetros de diámetro. Alrededor suyo, en todo el Golfo de México, se han encontrado vastos yacimientos de "tectitas", una clase especial de cristales resultantes de impactos. Además, los estratos geológicos alrededor de la zona indicada testimonian la increíble potencia que tuvieron las ondas de choque, tanto terrestres como marinas. La datación de Chicxulub es precisa: tiene 64,98 millones de años (con un margen de error de 0,05 millones de años).

Es sabido, aunque no esté completamente comprobado, que en aquella

8. EL METEOR CRATER, en Arizona, se originó hace cerca de 10.000 años como consecuencia de la explosión de un objeto metálico de varias decenas de metros de diámetro. El cráter tiene un diámetro de 1,5 kilómetros y una profundidad de unos 60 metros. La zona devastada por el impacto y por la caída del material lanzado al aire por el proyectil se extiende en todas las direcciones a lo largo de decenas de kilómetros. No son muchos los casos conocidos de este tipo.

época, la de transición entre el período cretácico y la era terciaria, se produjeron extinciones generalizadas de seres vivos; no sólo los últimos dinosaurios (que probablemente estaban ya en vías de desaparición), sino numerosos grupos de organismos marinos, como los ammonites y los belemnites, desaparecieron "repentinamente". Tal afirmación ha de tomarse con mucha cautela, porque no es fácil determinar la duración de "repentinamente", pero una cosa parece cierta: se produjo un acontecimiento catastrófico y su potencia pudo haber sido suficiente para explicar cuanto la paleontología parece mostrar.

Este acontecimiento no ha sido el único, y puede que ni siquiera el más violento, de los últimos 600 millones de años. Esto plantea la pregunta de cuántas veces habrá comenzado la vida su aventura sobre la Tierra y cuántas habrá tenido que interrumpirla por episodios similares. En fin de cuentas, puede que nosotros debamos nuestra existencia a un evento muy destructivo, que puso en serio peligro toda la vida terrestre pero que al mismo tiempo permitió el enorme desarrollo de los mamíferos. A él se le debería también la posibilidad de que la vida, por medio de la inteligencia, tome conciencia del peligro y busque los medios para afrontarlo. O, al menos, eso es lo que esperamos.

En 1990 el Congreso de los Estados Unidos encargó a la NASA que estudiara el problema de los impactos extraterrestres desde dos puntos de vista: uno, científico, destinado a aclarar cuál sea el peligro real, y el otro, técnico, sobre posibles medidas que pudieran adoptarse para limitar, o "mitigar", en una jerga más militar, las probables consecuencias. El resultado de los trabajos al efecto fueron dos informes fechados en 1992. En 1993 volvió a examinarse la cuestión por el Congreso, requiriendo el testimonio de los presidentes de los grupos de trabajo. En agosto de 1994 los Estados Unidos han formado un equipo en la NASA, bajo la presidencia de Eugene M. Shoemaker, para estudiar la creación de un sistema de vigilancia que, dentro de diez años, esté en condiciones de descubrir todos los NEO peligrosos; la decisión puede que se haya visto influida por la colisión del cometa P/Shoemaker-Levy con Júpiter, de energía equivalente a un millón de megatones, producida ese mismo año.

Sin embargo, el Congreso norteamericano ha pecado de optimismo. Como indicaba el informe Morrison (elaborado por el primer grupo de trabajo, el científico, presidido por Dave Morrison), no es concebible que se logre descubrir todos los NEO peligrosos (y menos aún en diez años). Hay dos buenas razones para ello. Entre los NEO se incluyen todos los cometas, ya sea su período corto o largo. Con esfuerzo y con cierta aproximación puede seguirse la trayectoria de los de período corto, pero los de período largo son absolutamente imprevisibles. Se los suele descubrir cuando ya se encuentran muy introducidos en el sistema solar, a pocos meses de su paso junto al Sol (y por tanto, en general, próximos a la Tierra). Pero se considera actualmente que el conjunto de los cometas, aunque no contribuya en más del diez por ciento al número total de los NEO, representa alrededor del veinticinco por ciento de su peligro total.

Ya hemos aludido a la otra razón por la que es harto probable que las demandas del Congreso norteamericano se vean a la postre desatendidas. Si se dispusiese de una red de observación permanente, dotada de instrumentos astronómicos más bien corrientes pero dedicada por completo a esta finalidad, que estuviese conectada por un sistema de comunicaciones eficaz y distribuida regularmente por todo el mundo, se podría pensar en descubrir el noventa por ciento de los NEO mayores de un kilómetro, pero no en diez años, sino en veinticinco. Es decir, sería necesario un sistema como el que el citado informe llama "Spaceguard Survey", que constituiría un primer y esencial sistema de defensa.

CATEGORIA	TIEMPO DE PREAVISO	POSIBLES ACCIONES	DISTANCIA DE INTERCEPCION	VARIACION DE VELOCIDAD REQUERIDA	CLASE DE OBJETO
Orbitas bien definidas	Decenas o centenares de años	Misiones espaciales a largo plazo	2 UA	1 cm/s	Asteroides
Orbitas inciertas	Años o decenios	Respuesta urgente sin margen de error	2 UA	10-100 cm/s (errores grandes) (errores menores)	Asteroides Cometas
Peligro inmediato	De un mes a un año	Todas las medidas posibles: emergencia	0,1 UA Cometas 0,1-1 UA Asteroides	>1 m/s a 0,1 UA >0,1 m/s a 1,0 UA	Cometa de período largo (LP) Asteroide recién descubierto
Sin preaviso	De 0 a 30 días	Evacuación de la zona de impacto	0 UA	No puede hacerse nada	Cometa LP o asteroide no identificado

9. CLASIFICACION DE LOS OBJETOS que siguen una trayectoria de impacto con la Tierra en función del tiempo de preaviso útil para las contramedidas pertinentes. Se indican para todas las categorías las posibles acciones de protección, con la distancia de intercepción y la variación de velocidad que sería necesario impartir al objeto para conjurar el choque. La tabla ha sido elaborada por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) de los EE.UU.



10. EL CRATER FOSIL DE CHICXULUB, de más de 200 kilómetros de diámetro, yace semisumergido en el borde septentrional de la Península de Yucatán, en México. El cráter, el mayor hallado hasta ahora en la Tierra, está enteramente recubierto de depósitos sucesivos. Tiene una edad de 64,98 millones de años, correspondiente a la transición entre la Era secundaria y la terciaria, época en la que tuvo lugar una gran extinción generalizada.

El *Spaceguard Survey*, que se encuentra todavía en fase de proyecto, ha de enfocarse por lo demás como una empresa internacional. No es concebible que se responda sobre una base nacional, aunque sea con las mejores intenciones, a un problema que involucra a todas las naciones de la Tierra. El *Spaceguard Survey* prevé el uso de seis telescopios de entre dos y tres metros de diámetro (una dimensión media para la astronomía de hoy; hay quien sostiene que instrumentos de menor potencia serían suficientes), uniformemente distribuidos sobre la superficie de la Tierra. Estarían equipados con modernos detectores electrónicos y obtendrían resultados de calidad. El sistema mantendría bajo control la totalidad de la bóveda celeste y analizaría las imágenes en busca de objetos de movimiento veloz (todos los cercanos a la Tierra se mueven más bien rápidamente respecto a ella). Por lo demás otras investigaciones astronómicas, y no sólo planetarias, se beneficiarían de una vigilancia continua del cielo: piénsese, por ejemplo, en el estudio de las estrellas variables o en el descubrimiento de supernovas.

En lo referente a qué hacer para defenderse de la amenaza, no se puede decir que existan todavía propuestas, aunque no falten personas que las auspicien y, en sentido contrario, muchos otros a quienes preocupe que se intentase llevarlas a la práctica. Hay que reconocer que, frente a lo que sucede con muchas otras catástrofes naturales, es posible hacer algo para prevenir los impactos sobre la Tierra. Es cierto que sería necesario conocer con exactitud y con mucha antelación el tiempo y el lugar, pero no es pura fantasía científica pensar en desviar de su trayectoria un cuerpo tan grande como una montaña. Si se descubriese indubitablemente un NEO algunas decenas de años antes de la colisión (*véase la tabla*), sería concebible una intervención capaz de desviarlo lo suficiente para que no prosiguiese su rumbo destructivo, incluso con métodos que no requerirían explosivos nucleares. Pero si el descubrimiento de un posible choque se realizase con pocas semanas o meses de antelación, sería inevitable recurrir a las armas nucleares, que permiten obtener la máxima potencia con el menor peso.

No obstante, cualquiera puede comprender que el asunto es muy delicado y que ha de procederse con pies de plomo para evitar que una empresa de prevención pueda convertirse en pretexto para la ampliación o el estudio de técnicas destructivas de las que realmente no hay ninguna necesidad. Este es el motivo principal por el que sería deseable que todos los estudios sobre posibilidad de impactos, emprendidos por cualquier razón, se pusieran cuanto antes bajo el control internacional y que la opinión pública estuviese informada continuamente de cuanto se fuese proyectando.

En 1991 la Unión Astronómica Internacional (IAU) formó un grupo de estudio, que tengo el honor de presidir, para evaluar el riesgo de los impactos cósmicos y para contribuir a la formación de una conciencia del problema, sobre todo en el campo astronómico.

No es un trabajo fácil, porque no se trata sólo de evaluar los aspectos técnico-científicos del asunto. Son indispensables, y lo serán cada vez más en los próximos años, relaciones complicadas con el mundo político y militar; hay que realizar una labor de persuasión, incluso entre nuestros colegas astrónomos; y habrá que llegar a los centros de decisión —gobiernos y asociaciones profesionales internacionales— que son los únicos capaces de proporcionar los recursos y las coberturas políticas e institucionales para una empresa de esta clase.

Desearía terminar con una consideración enteramente personal: yo he sido escéptico durante muchos años sobre este asunto y pensaba que la hipótesis de los impactos como factor desencadenante de catástrofes ecológicas era artificiosa y superflua. He tenido que cambiar de opinión, como sucede a menudo en el trabajo científico, porque la fuerza de los hechos es más fuerte que la instintiva desconfianza. Todos nosotros deseamos que nuestras investigaciones nunca conduzcan al descubrimiento de objetos predestinados a chocar con la Tierra, y así sucederá muy probablemente, al menos durante algún tiempo. Pero sería torpe que, una vez conocedores de un posible peligro, no emprendiésemos todas las acciones razonables para conjurarlo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE SPACEGUARD SURVEY, Report of the NASA International Near-Earth-Object Detection Workshop. Publicado bajo la dirección de D. Morrison. NASA, Office of the Space Science and Applications, 1992.

REPORT OF THE NASA NEAR-EARTH-OBJECT INTERCEPTION WORKSHOP. Publicado bajo la dirección de G.D.J. Rather y J.H. Rahe. NASA, Office of the Space Science and Applications, 1992.

IAU WORKING GROUP ON NEAR-EARTH OBJECTS. REPORT ON ACTIVITY. Publicado bajo la dirección de J. Bergeron. IAU Reports on Astronomy, 199-204. Kluwer, Dordrecht, Holanda, 1994.

HAZARDS DUE TO COMETS AND ASTEROIDS. Publicado bajo la dirección de T. Gehrels y M. Matthews. University of Arizona Press, Tucson, 1995.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

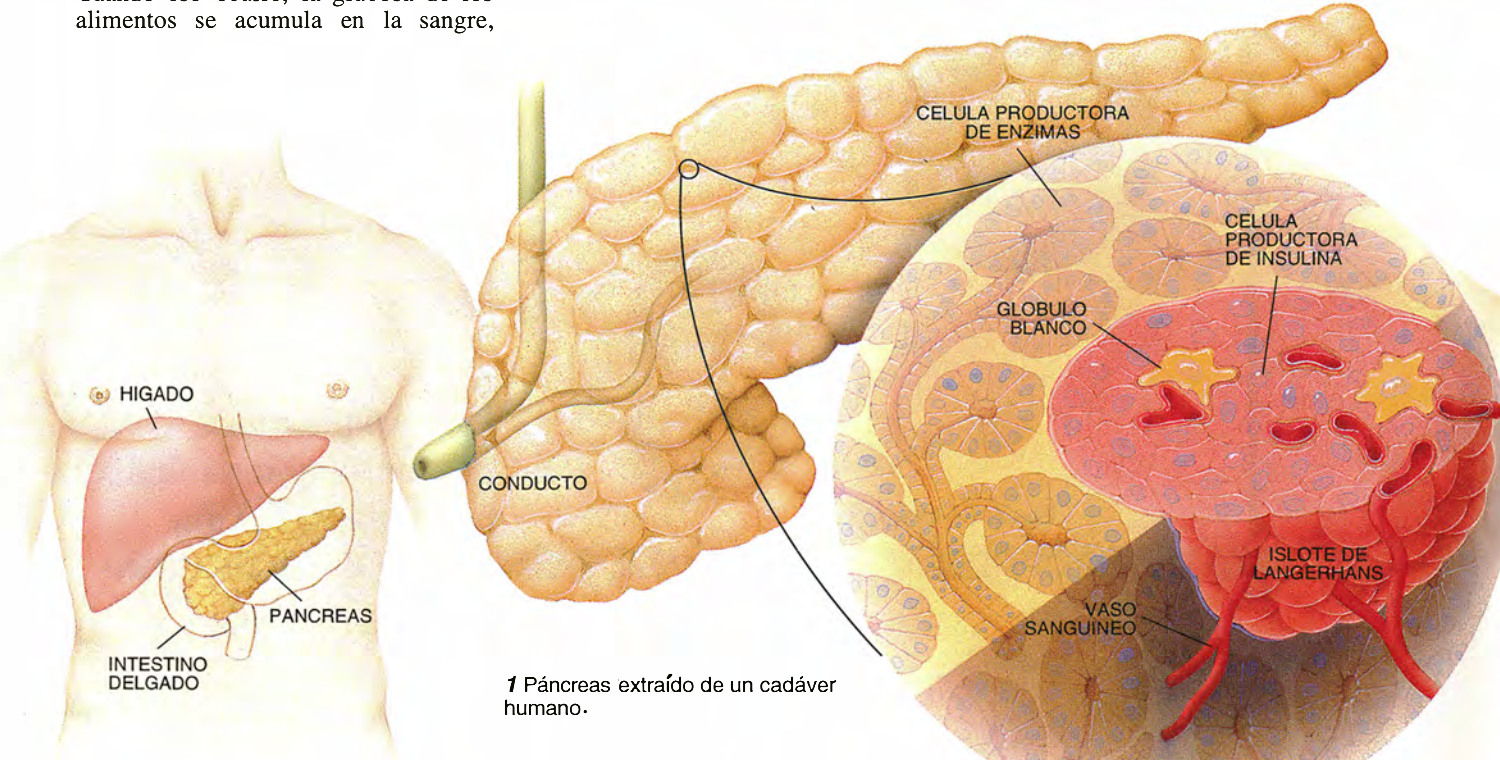
Tratamiento de la diabetes por trasplante celular

La implantación de células de los islotes del páncreas cura muchos casos de diabetes. Cuando se logre evitar el ataque del sistema inmunitario contra los injertos, se generalizará su uso

Paul E. Lacy

Hasta hace unos 75 años la forma de diabetes que afecta a niños y jóvenes era mortal de necesidad. Familiares y médicos veían impotentes cómo jóvenes robustos se consumían y morían en pocos meses tras el diagnóstico. A principios de siglo se descubrió que el problema radicaba en unas pequeñas acumulaciones de células pancreáticas llamadas islotes de Langerhans. Era evidente que estos islotes segregaban una hormona decisiva, llamada luego insulina, que permitía que otras células del organismo captasen la glucosa de la sangre para obtener energía. También estaba claro que los pacientes diabéticos no producían insulina (ahora se dice que tienen diabetes de tipo I, dependiente de la insulina o insulinodependiente). Cuando eso ocurre, la glucosa de los alimentos se acumula en la sangre, mientras que otros tejidos mueren por falta de ella. Las personas cuya diabetes es de aparición tardía, caso que es el más habitual y se denomina de tipo II o no dependiente de insulina, tienen mejor pronóstico, pues siguen fabricando algo de insulina.

Las perspectivas de los diabéticos de tipo I cambiaron sustancialmente cuando, a principios de los años veinte, se comprobó que la insulina de origen animal podía salvarles la vida. Desde entonces se dio por supuesto que la inyección diaria de la hormona equivalía a la curación. Pero, por desgracia, esto no es cierto. La experiencia acumulada a lo largo de los años hizo que los clínicos se percatasen de que muchos de estos pacientes sufrían otras enfermedades muy graves como consecuencia de la diabetes. El lento deterioro de sus capilares terminaba a menudo en ceguera o en fallo renal, cuando no en ambas cosas. El estrechamiento de otros vasos conducía a la aterosclerosis, mientras que la degeneración de los nervios se manifestaba en forma de adormecimiento y dolor de las extremidades. Está comprobado que la causa de todas estas "complicaciones a largo plazo" es el exceso de glucosa en la sangre y la consecuente alteración de los tejidos expuestos al exceso de azúcar. Es evidente que las inyecciones de insulina de las que depende la vida de los diabéticos de tipo I no pueden

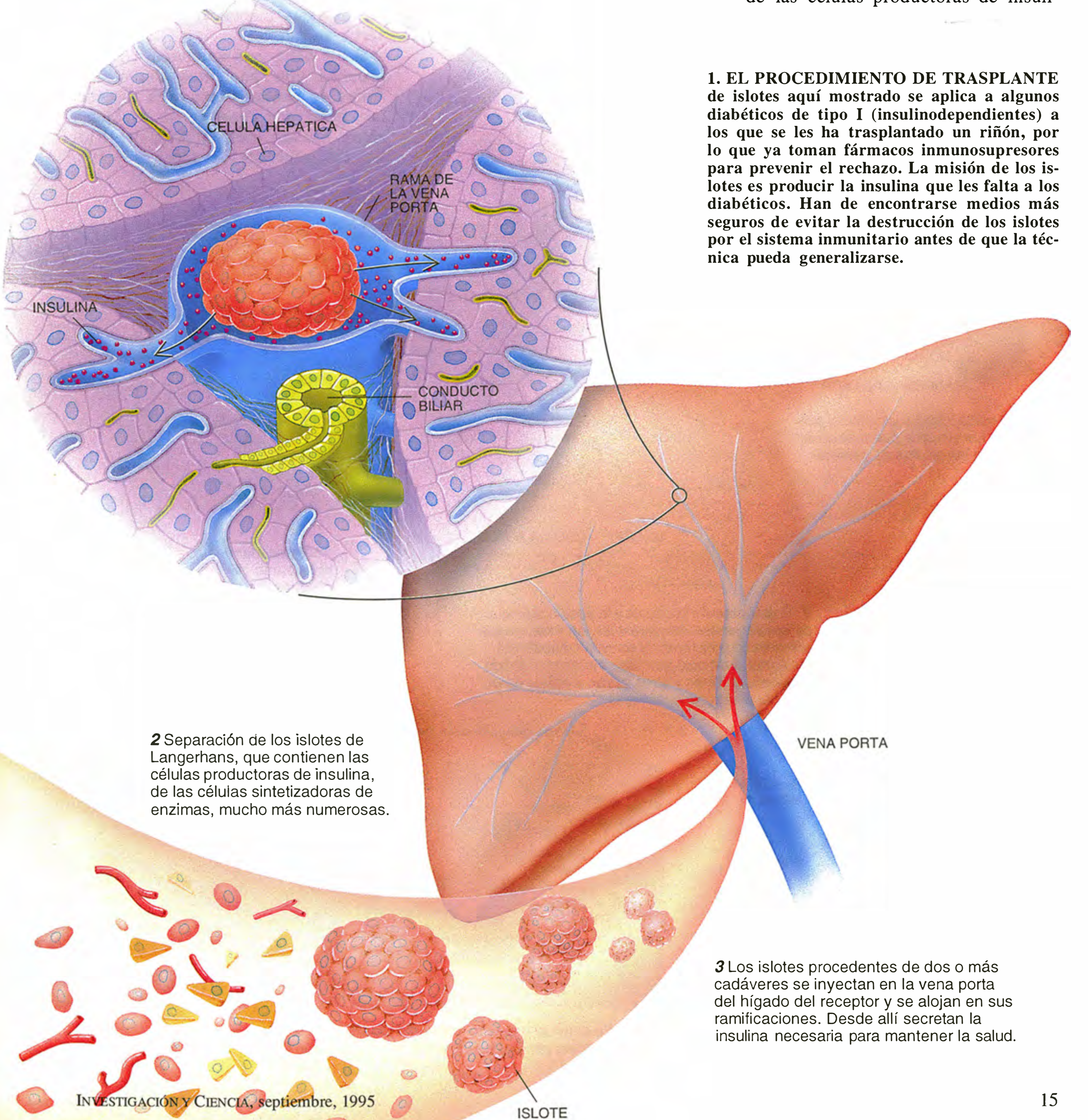


1 Páncreas extraído de un cadáver humano.

imitar con precisión la habilidad del páncreas normal para detectar los niveles de glucosa en sangre y producir la insulina necesaria para mantener el cuerpo sano.

La terapia requerida para conservar la salud a la larga tiene, pues, que mantener siempre los valores de glucosa dentro de límites normales desde el inicio de la enfermedad. La implantación de islotes sería un tratamiento ideal, porque restauraría la producción correcta de insulina y porque, al menos en teoría, bastaría con una sola operación, dada su larga vida y su capacidad regenerativa. Los injertos evitarían también las enfermedades agudas relacionadas con la diabetes, entre las que se encuentran el coma, cuando la glucosa se acumula en la sangre hasta niveles muy elevados (hiperglucemia), y otras reacciones que aparecen cuando la dosis inyectada los rebaja demasiado (hipoglucemia), manifestadas en forma de temblores, confusión o desvanecimientos. El trasplante de islotes es fácil de comprender, pero ha sido difícil de conseguir. Sin embargo, hemos llegado a un punto en el que hay buenas razones para pensar que muchos pacientes se beneficiarán de esta terapia en los próximos cinco años y que no tardará mucho en convertirse en rutinaria para los recién diagnosticados.

La mayor parte del trabajo inicial, empezado hace unos 25 años, se llevó a cabo en mi laboratorio universitario, donde se continúa una intensa investigación sobre trasplantes. Al principio no nos preocupaba la terapia; tratábamos de comprender los mecanismos de secreción hormonal de las células productoras de insuli-



1. EL PROCEDIMIENTO DE TRASPLANTE de islotes aquí mostrado se aplica a algunos diabéticos de tipo I (insulinodependientes) a los que se les ha trasplantado un riñón, por lo que ya toman fármacos inmunosupresores para prevenir el rechazo. La misión de los islotes es producir la insulina que les falta a los diabéticos. Han de encontrarse medios más seguros de evitar la destrucción de los islotes por el sistema inmunitario antes de que la técnica pueda generalizarse.

2 Separación de los islotes de Langerhans, que contienen las células productoras de insulina, de las células sintetizadoras de enzimas, mucho más numerosas.

3 Los islotes procedentes de dos o más cadáveres se inyectan en la vena porta del hígado del receptor y se alojan en sus ramificaciones. Desde allí secretan la insulina necesaria para mantener la salud.

na, las células β. Las restantes células del islote segregan hormonas que ayudan a regular la cantidad de insulina sintetizada.

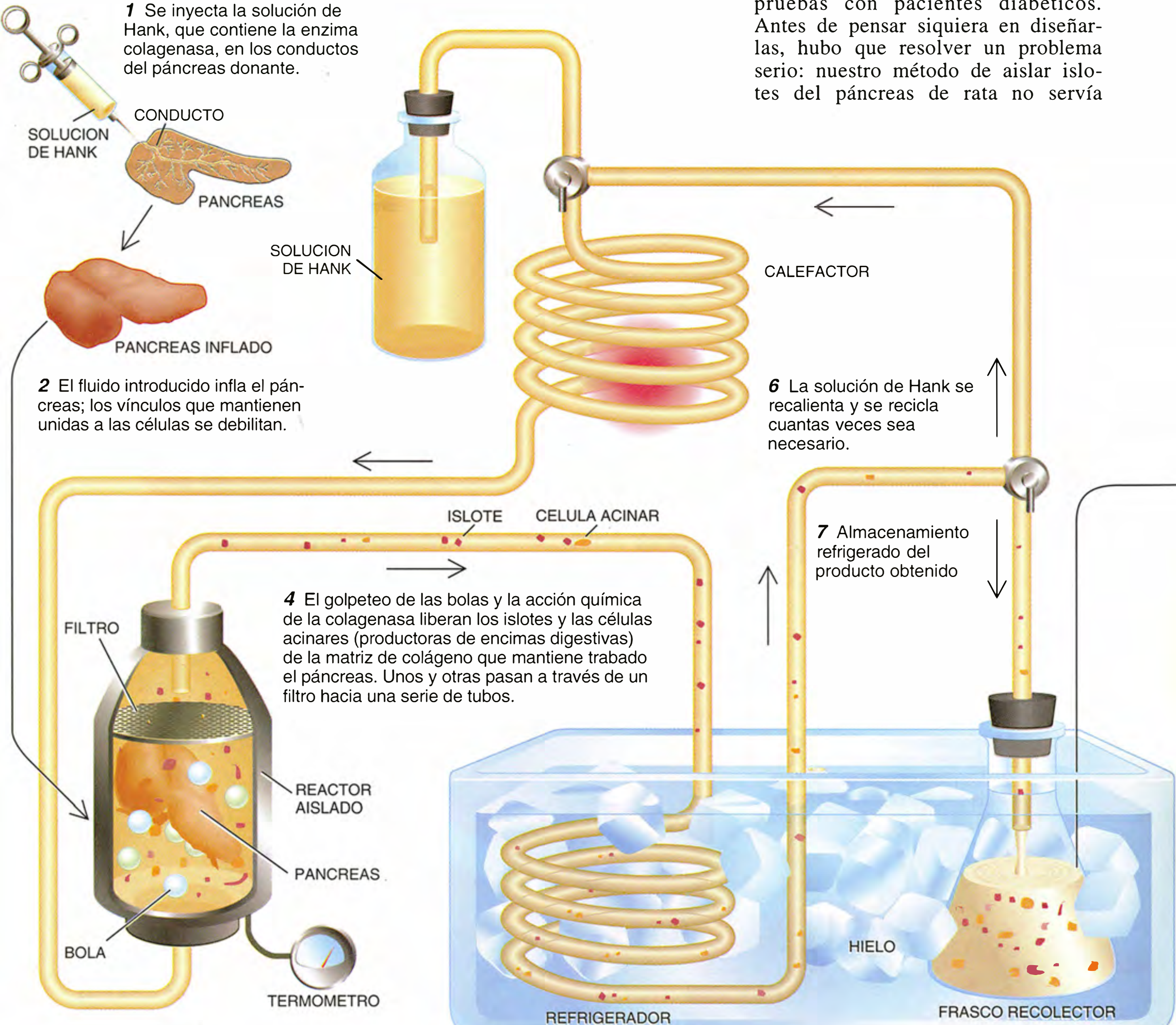
Euforia inicial

Para la realización de tales estudios tuvimos que obtener islotes pancreáticos de animales de laboratorio. Estos cúmulos celulares sólo constituyen el dos por ciento del peso del páncreas y están muy dispersos dentro de él. El resto del páncreas se dedica a fabricar potentes enzimas digestivas y no hormonas. En 1967 conseguimos establecer un método que nos permitía obtener los islotes necesarios del páncreas de rata. Una vez dispusimos de ellos, no pudimos resistir la tentación de comprobar si podían regular, en animales diabéticos, los niveles de azúcar de la sangre y prevenir complicaciones. Después de todo, el éxito significaría que el trasplante de islotes podría beneficiar a los pacientes diabéticos.

En 1972, con la colaboración de Walter F. Ballinger y David W. Scharp, trasplantamos islotes extraídos de ratas de una estirpe endogámica a otras ratas del mismo grupo, a las que se había convertido en diabéticas inyectándoles un producto que destruye específicamente las células β. Elegimos estas ratas porque los animales endogámicos son idénticos; por tanto, las defensas inmunitarias de los receptores no rechazarían por extraño o foráneo el injerto. Para nuestra satisfacción, las ratas trasplantadas volvieron a tener niveles normales de glucosa en sangre y los mantuvieron permanentemente. Estudios posteriores revelaron que los injertos de islotes podían prevenir complicaciones microvasculares precoces de los ojos y de los riñones de las ratas diabéticas e incluso invertir su curso.

Estos datos nos animaron a iniciar pruebas con pacientes diabéticos. Antes de pensar siquiera en diseñarlas, hubo que resolver un problema serio: nuestro método de aislar islotes del páncreas de rata no servía

SEPARACION DE LOS ISLOTES DE UN PANCREAS HUMANO



1 Se inyecta la solución de Hank, que contiene la enzima colagenasa, en los conductos del páncreas donante.

2 El fluido introducido infla el páncreas; los vínculos que mantienen unidas a las células se debilitan.

3 El páncreas se coloca en una cámara que contiene bolas de vidrio y solución de Hank; la temperatura de esta última es la de su máxima actividad. Se agita el reactor.

4 El golpeteo de las bolas y la acción química de la colagenasa liberan los islotes y las células acinares (productoras de encimas digestivas) de la matriz de colágeno que mantiene trabado el páncreas. Unos y otras pasan a través de un filtro hacia una serie de tubos.

5 Se enfría el producto resultante para que las enzimas digestivas secretadas por las células acinares no destruyan los islotes.

6 La solución de Hank se recalienta y se recicla cuantas veces sea necesario.

7 Almacenamiento refrigerado del producto obtenido

para el órgano humano. Pasamos tres años probando métodos diversos hasta que, a mediados de los años ochenta, Scharp, Camillo Ricordi y yo conseguimos finalmente uno semiautomático de uso general hoy en día. Gracias a él pueden obtenerse unos 400.000 islotes del millón que aproximadamente tiene un páncreas humano; por suerte ésa era la cantidad que nosotros considerábamos necesaria para mantener los niveles normales de azúcar en la sangre de los pacientes diabéticos.

Pruebas prometedoras en seres humanos

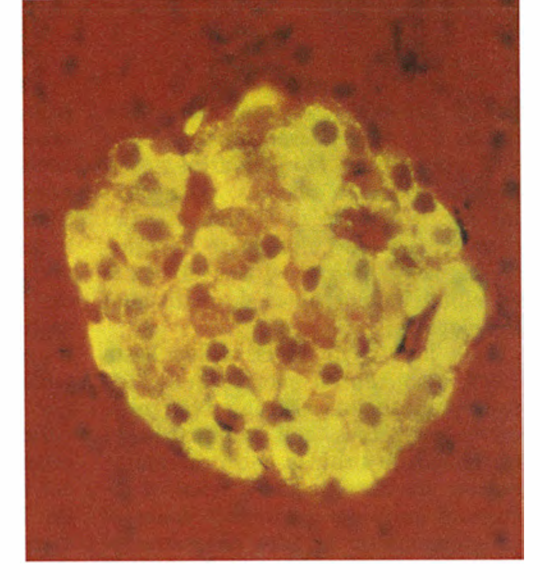
En 1986 iniciamos el primer estudio de implantación de islotes aislados en personas. La casi seguridad de que el sistema inmunitario de los receptores rechazaría el tejido foráneo impidió que se hiciera con pacientes recién diagnosticados, como sería lo deseable. Para evitar tales rechazos hubiéramos tenido que darles fármacos inmunosupresores. Dados los peligrosos efectos secundarios que pueden acarrear tales fármacos —infecciones, cáncer y lesiones renales, entre otros— su riesgo era demasiado grande para utilizarlos en pacientes que están sanos, aunque necesiten tomar insulina. Por tanto, el estudio se realizó con un grupo de diabéticos de tipo I que habían recibido un trasplante de riñón, y ya tomaban, pues, inmunosupresores para proteger el nuevo riñón.

Scharp y yo decidimos colocar los islotes en las ramificaciones hepáticas de la vena porta, en buena medida por su facilidad de acceso. La realización del trasplante era sencilla: gracias a una pequeña incisión cerca del ombligo, un tubo introduce los islotes en una vena tributaria de la vena porta. Una vez alojados en los vasos más pequeños de las ramificaciones de ésta, los islotes permanecen en contacto directo con la sangre, lo que les permite detectar continuamente sus niveles de azúcar al tiempo que se nutren. Si esto funcionase, no sería necesario reubicar los islotes en el páncreas, empresa mucho más difícil.

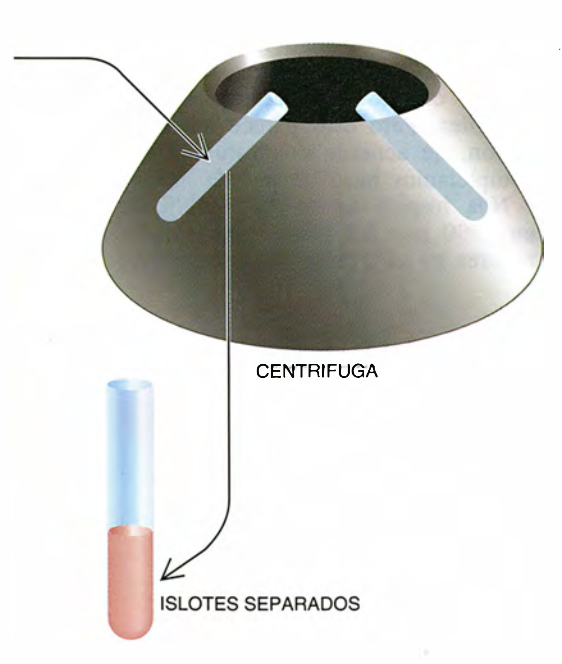
Los resultados fueron prometedores. Los injertos funcionaron en personas que habían recibido 400.000 islotes, aunque no fabricaban la suficiente insulina para permitir la supresión total de las inyecciones. Posteriormente aumentamos el número a 800.000 y algunos pacientes se liberaron de las inyecciones, al menos durante un tiempo. Otros laboratorios confirmaron nuestros resultados. Se comprobó también que los islotes congelados funcionaban bien, pudiéndose pensar en almacenarlos para su uso futuro.

Son unos ciento cincuenta los pacientes de todo el mundo que han recibido trasplantes procedentes de cadáveres humanos desde 1990. En algunos casos se les aplicaron concentrados de islotes y, en otros, preparaciones menos puras. Los islotes no han podido regular por completo el azúcar de la sangre de la mayoría de ellos o han perdido parte de su actividad en un período de tres años. Sospechamos que una posible causa es que no se implantaran los suficientes islotes para las necesidades concretas de cada individuo. El fallo posterior de los implantes que en un comienzo lograban controlar la glucemia podría atribuirse al esfuerzo inicial a que se vieron sometidos: después de trabajar a su máxima capacidad durante algún tiempo, las células quedarían exhaustas. El rechazo y otros procesos inmunitarios deben haber desempeñado también un papel importante en muchos de los fallos, tanto precoces como tardíos.

A pesar de resultados tan insatisfactorios, muchos médicos se plantean ahora la conveniencia de conjugar el trasplante de islotes con el de riñón en el caso de los diabéticos de tipo I. La razón de que se considere esta alternativa es que, incluso si los pacientes siguen necesitando las inyecciones de insulina, la presencia de islotes que funcionen puede ayudarles a mantener continuamente los niveles de azúcar sanguíneo dentro de los márgenes normales. Otra razón adicional es que el trasplante de islotes es mucho más sencillo que la reposición total o parcial del páncreas, procedimiento al que a veces se ha recurrido cuando pacientes diabéticos recibían un trasplante de riñón. De lo que se trata con tales maniobras es de proteger a toda costa el riñón donado de los perjuicios de un exceso de glucosa. El trasplante de islotes es lógicamente menos caro que el de órganos. Su administración a la vena porta puede hacerse con anestesia local y un coste de unos cuantos cientos de miles de pesetas, mientras que un trasplante de páncreas es una operación de cirugía mayor cuyo coste sube a varios millones de pesetas.



2. LOS ISLOTES DEL PANCREAS de una rata se parecen a los humanos. En ambas especies predominan las células β (*doradas*), que son las productoras de insulina y se agrupan en el centro. Están rodeadas por otras células que secretan diferentes hormonas y no se ven en la ilustración. La zona roja es tejido pancreático distinto.



8 Los islotes se separan por centrifugación del material recogido. De un páncreas humano pueden obtenerse unos 400.000 islotes, aproximadamente la mitad de los necesarios para mantener el nivel normal de glucosa de la sangre.

A por los polizones

Una vez que los estudios realizados en pacientes inmunosuprimidos demostraron que los trasplantes de islotes funcionaban en quienes los recibían, muchos investigadores aumentaron sus esfuerzos para encontrar maneras seguras de prevenir el rechazo. Dos son las estrategias básicas que se han seguido últimamente en la experimentación con animales. Una se basa en la sugerencia hecha por George D. Snell, allá

por el año 1957, de que el rechazo de un órgano se desencadena no por sus constituyentes primarios, sino por los glóbulos blancos, o leucocitos, de la sangre que lleva consigo el injerto. Si la culpa fuese de estos "polizones", podría evitarse el rechazo eliminándolos antes de realizar el trasplante.

Esta idea cayó en el olvido hasta 1975, momento en que Kevin J. Lafferty la resucitó, al comprobar que, en experimentos que implicaban el trasplante de tiroides entre diferentes estirpes de ratones, podía evitar el rechazo si cultivaba los tiroides donantes en presencia de grandes concentraciones de oxígeno antes de implantarlos. Llegó a la conclusión de que los injertos sobrevivían porque el oxígeno destruía los leucocitos, y sólo los leucocitos, que había en ellos.

Además propuso una explicación razonable de por qué estos leucocitos producían el rechazo y por qué no lo producía el resto de los constituyentes del tejido trasplantado. Es opinión común que los agentes responsables del rechazo son ciertos leucocitos del receptor a los que se llama linfocitos *T* asesinos. Según Lafferty, para que estas células salgan de su estado inactivo y empiecen a atacar a otras células deben recibir dos señales. La primera se produce cuando reconocen determinadas proteínas de la superficie de las células implantadas, proteínas a las que se denomina antígenos del complejo principal de histocompatibilidad de clase I o, más comúnmente, proteínas especificadoras de tejido. Es verosímil que la segunda señal se produzca cuando las células extrañas liberan unas proteínas pequeñas, llamadas citocinas, que actúan sobre los linfocitos *T*.

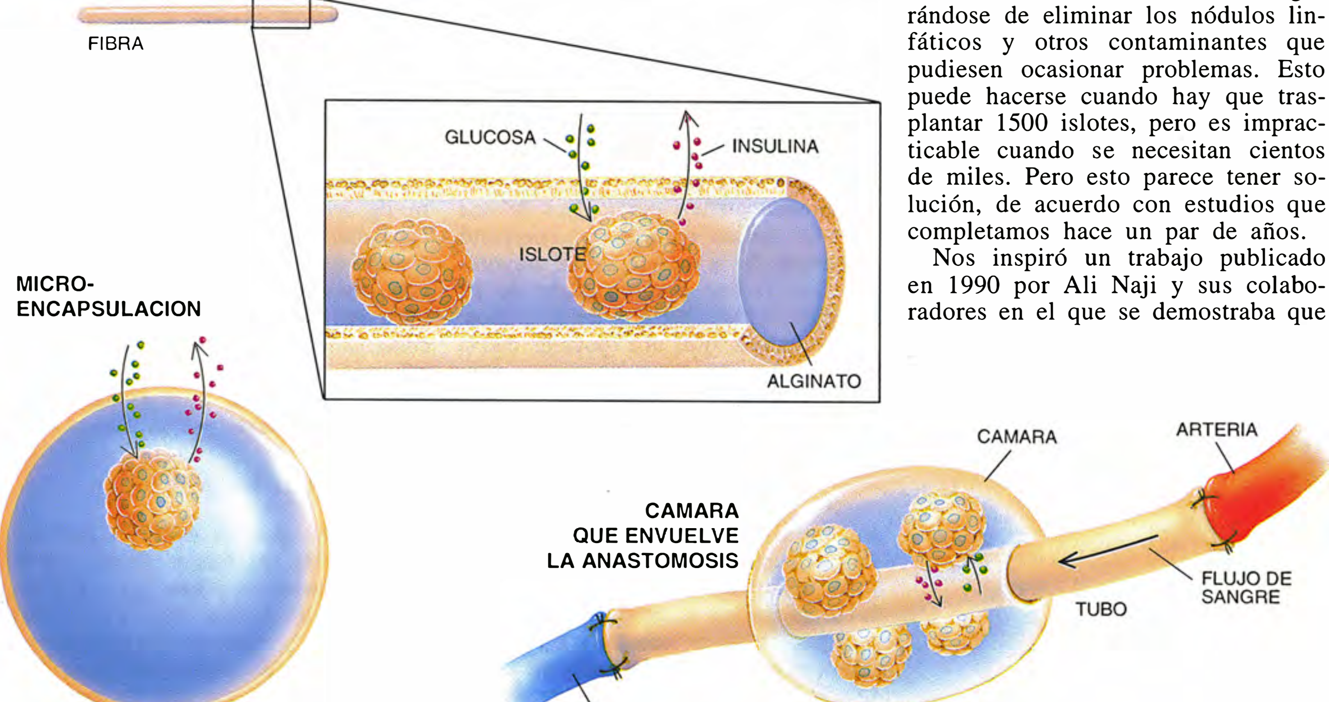
Lo que diferencia a los leucocitos acompañantes de las restantes células del injerto es que los primeros, aparte de llevar los antígenos correspondientes, se piensa que también pueden segregar las citocinas necesarias, mientras que las segundas (p. ej., las células de los islotes productoras de hormonas) sólo generan la primera señal (presentan el antígeno de superficie). Una vez activados los linfocitos *T* asesinos, atacan a cualquier célula del injerto que lleve el antígeno de reconocimiento, aunque no genere la segunda señal. En cambio, si lo único que reciben los linfocitos *T* es la primera señal, parece que toleran a otras células aunque tengan el antígeno de reconocimiento.

Nos decepcionó mucho comprobar que el método usado por Lafferty para destruir los leucocitos asociados no funcionaba en el caso de los islotes, pues los elevados niveles de oxígeno requeridos destruían también las células productoras de hormonas. Tras muchas pruebas y fracasos, Joseph M. Davie y yo conseguimos en 1979 una técnica de cultivo que dañaba solamente a los polizones. Si poníamos unos 1500 islotes tratados, provenientes de determinada estirpe de rata, en la vena porta de ratas de otra estirpe y les dábamos a los animales receptores una única inyección de un producto que inactivase temporalmente su sistema inmunitario, el rechazo se evitaba por completo. Es más, el mismo procedimiento básico servía para evitar el rechazo entre especies diferentes, de rata a ratón. Después se han desarrollado, en nuestro laboratorio y en otros, muchos métodos distintos para alterar o destruir los leucocitos de los islotes.

Por desgracia había un aspecto esencial de los procedimientos utilizados con los roedores que no era factible con los seres humanos. En el primer caso los investigadores seleccionan a mano los islotes, asegurándose de eliminar los nódulos linfáticos y otros contaminantes que pudiesen ocasionar problemas. Esto puede hacerse cuando hay que trasplantar 1500 islotes, pero es impracticable cuando se necesitan cientos de miles. Pero esto parece tener solución, de acuerdo con estudios que completamos hace un par de años.

Nos inspiró un trabajo publicado en 1990 por Ali Naji y sus colaboradores en el que se demostraba que

PAUL E. LACY es profesor emérito de patología en la facultad de medicina de la Universidad Washington en San Luis (EE.UU.), donde ocupó la cátedra Robert L. Krok desde 1985 hasta el pasado mes de abril. Se licenció por la Universidad del Estado de Ohio en 1948 y se doctoró por la de Minnesota en 1955.



3. EL ENCAPSULAMIENTO DE LOS ISLOTES en plástico semiporoso es uno de los métodos más prometedores para protegerlos de los ataques del sistema inmunitario. Se muestran tres variantes que se están investigando. En todas ellas el plástico permite que la glucosa de la sangre alcance los cúmulos celulares y que la insulina secretada en respuesta pase al torrente sanguíneo; impide, sin embargo, que los glóbulos blancos y los anticuerpos (*no representados*) alcancen a los islotes.

el trasplante de islotes de una cepa de ratas al timo de ratas de otra diferente no sólo inducía la tolerancia de estos islotes sino también la de otros idénticos que se injertaran más tarde en cualquier parte del cuerpo. Intrigados, mis colegas y yo decidimos ver si unos pocos islotes de rata cultivados que se implantasen en sitios distintos del timo del ratón bloquearían el rechazo de muchos islotes no tratados que se trasplantasen posteriormente. (Los trasplantes iban acompañados de inyecciones únicas de anticuerpos contra los leucocitos de rata y de ratón, con la esperanza de destruir cualquier leucocito remanente y para suprimir temporalmente la vigilancia inmunitaria del receptor.) Y así fue; tras implantar islotes cultivados de rata en la vena porta del hígado de los ratones, junto con las inyecciones de anticuerpos, los animales aceptaron posteriormente islotes sin manipular administrados en el mismo sitio. Este descubrimiento, que esperamos reproducir pronto en perros, nos anima a creer que podría "preinmunizarse" a los pacientes humanos con unos cuantos islotes cuidadosamente seleccionados para después proporcionarles el resto de células necesario, una vez inducida la tolerancia.

Camuflaje de los islotes

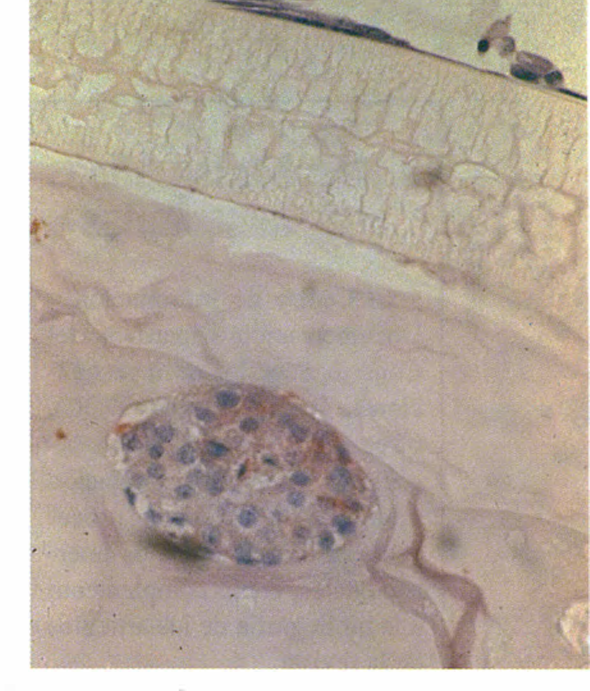
Los distintos métodos existentes para eliminar los efectos estimulantes de los leucocitos sobre el sistema inmunitario son sin duda prometedores; puede que se incorporen a los procedimientos futuros de trasplante de islotes. Pero en los últimos años somos muchos los investigadores que hemos pasado a centrar nuestra atención en la segunda estrategia antirrechazo aludida. La principal razón para hacerlo es la generalización de la idea de que la diabetes de tipo I es un proceso autoinmune diferente del rechazo. En esta reacción autoinmune, en la que participarían los anticuerpos y los linfocitos *T*, el sistema inmunitario del paciente percibiría como extraño algún antígeno de las células β propias, procediendo a destruirlas como si fueran invasoras [*véase* "Origen de la diabetes", por Mark A. Atkinson y Noel K. Maclaren; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1990]. Si así fuese, un ataque autoinmune dirigido directamente contra las células β volvería a destruir las segregadoras de insulina de los islotes trasplantados, aunque se lograse detener el rechazo.

Tal ataque podría prevenirse si se implantaran islotes cuyos antígenos específicos de tejido fueran distintos de los del receptor. Pero hay otra vía más segura para evitar tanto la autoinmunidad como el rechazo, consistente en ensayar la encapsulación de los islotes del donante en una membrana de plástico semipermeable. Esta membrana permitiría, cuando el tamaño de sus poros fuese el adecuado, que la glucosa alcanzase los islotes encapsulados y que la insulina fabricada y secretada se difundiera, pero impediría que linfocitos y moléculas de anticuerpos, ambos mucho más grandes que las moléculas de glucosa y de insulina, la atravesasen y llegasen a los islotes.

Entre las primeras técnicas de encapsulación está la desarrollada por William L. Chic en 1975. Sus islotes se colocaban en una cámara atravesada por un tubo de plástico, que se conectaba entre una arteria y una vena del roedor (anastomosis arteriovenosa). Cuando la sangre fluía desde la arteria a la vena por el tubo, la glucosa atravesaba su pared y llegaba a la cámara, donde entraba en contacto con los islotes; éstos segregaban la insulina, que refluía hacia la sangre del tubo, mientras que los linfocitos y los anticuerpos pasaban de largo sin percatarse del contenido de la cámara. Lo importante es que este artilugio corregía los niveles sanguíneos de glucosa, al menos durante algún tiempo. Sin embargo, los islotes terminaban muriendo debido a la coagulación de la sangre en las paredes del tubo, que obstruía sus poros. Desde entonces se ha mejorado la biocompatibilidad de este sistema, logrando que islotes caninos trasplantados a perros diabéticos normalizasen su nivel de azúcar durante algunos meses.

Yo tengo mis reservas sobre el uso de este método en seres humanos porque los sistemas de anastomosis son delicados. Así, por ejemplo, un golpe recibido durante un partido de fútbol entre adolescentes podría romperlo, lo que no sólo lo inutilizaría sino que además ocasionaría una hemorragia interna. La misma implantación viene complicada por el riesgo de formación de coágulos sanguíneos y los peligros consiguientes.

Franklin Lim y Anthony M. Sun inventaron un procedimiento diferente en 1980. Su preparación de islotes aislados consistía en suspenderlos en una solución viscosa de alginato, una substancia extraída de las algas. Si se añade calcio a la solución, se convierte en un gel, dentro de cada una de cuyas gotitas quedan atrapados uno o dos islotes. Las frágiles gotas se recubrían después con plástico y se colocaban en la cavidad abdominal. La razón del sitio escogido es que hay un flujo bidireccional continuo de fluido entre la sangre y la cavidad abdominal. Los islotes pueden recibir allí información de los niveles de glucosa en sangre y hacer llegar al torrente circulatorio la insulina que segregan. Las cápsulas regularon el azúcar de los roedores y evitaron el rechazo, pero el recubrimiento de plástico estimuló el crecimiento de tejido fibroso a su alrededor, lo que privaba de nutrientes a los islotes y terminaba matándolos.



4. ISLOTE HUMANO (*ovoide*) dentro de una fibra hueca; estuvo bajo la piel de un paciente diabético durante dos semanas antes de ser retirado y sometido a examen. El islote conservó su capacidad de secretar insulina, lo que indica que tales fibras, o medios parecidos que los almacenen de forma más compacta, los protegen adecuadamente.

Se han hecho otras gotas recubiertas de plástico más biocompatibles y hay informes de que lograron la remisión temporal de la diabetes de un paciente. A pesar de todo, su aplicación clínica sigue teniendo inconvenientes. Aunque cada una de las cápsulas sea pequeña, de menos de medio milímetro de diámetro, los varios cientos de miles necesarios para tratar la diabetes humana representan un volumen considerable. Para que resultase práctico su uso generalizado tendrían que ser más pequeñas y más estables. Habría que descubrir además alguna forma práctica de retirar todas las cápsulas administradas, si ello fuera necesario.

Para evitar todos estos inconvenientes nosotros encapsulamos los islotes en una fibra acrílica hueca y semipermeable, no más gruesa que el



5. DONALD E. SMITH, un norteamericano al que se le injertaron islotes tras su segunda operación de trasplante de riñón. Lleva más de un año sin tener que ponerse inyecciones de insulina y puede comer lo que quiera sin temor a que su nivel de glucemia se trastorne. No a todos los pacientes que han recibido el tratamiento les ha ido tan bien, pero se confía en que las técnicas en estudio permitan mantener los islotes trasplantados durante toda una vida.

alambre de un clip. Adoptamos esta fibra polimérica hace cinco años, tras la comprobación de su gran biocompatibilidad realizada por unos investigadores de la enfermedad de Parkinson. Empezamos inyectando islotes de rata en fibras huecas, sellando los extremos y poniendo uno o dos tubos de éstos en la cavidad abdominal de ratones diabéticos. El azúcar sanguíneo se normalizó y se mantuvo así hasta 12 días, pero luego retornó la diabetes. Creímos habernos metido en un callejón sin salida pensando que los islotes habían sido rechazados.

Pero los análisis microscópicos de los implantes mostraron que el fallo se debía a que los islotes se habían apelmazado en su interior, ocasionando la muerte de los más interiores por desnutrición. Este problema pudo corregirse fácilmente, pues bastó con rellenar los tubos con una suspensión de islotes en gel de alginato. Los nuevos implantes, ya se colocasen en la cavidad abdominal o debajo de la piel, mantuvieron normales los niveles de glucemia durante todo un año de observación (la mitad de la vida media de un ratón). No menos importante fue la buena tolerancia de los implantes, pues la cantidad de tejido fibroso que se formó alrededor de la superficie externa de los finos tubos de plástico fue pequeña. Hace un año que Scharp y yo hemos iniciado los estudios preliminares de este método con seres humanos. Pusimos fibras que contenían un pequeño número de islotes, entre 150 y 200, bajo la piel de pacientes con diabetes de tipo I y de otros con diabetes de tipo II, manteniéndolas colocadas durante dos semanas. Afortunadamente no hubo ni rechazo inmune ni destrucción autoinmune.

Las próximas etapas

Las investigaciones realizadas hasta ahora en animales y en pacientes indican claramente que la encapsulación de los islotes en una membrana biocompatible debería ser bien tolerada. Si se administrase un número suficiente de islotes, deberían eliminar la diabetes, puede que indefinidamente. Quedan, sin embargo, algunos obstáculos técnicos, en su mayoría relacionados con el enorme número de islotes que hay que implantar.

Aunque las fibras huecas los almacenen de forma más compacta que la encapsulación de cada islote por separado, seguiría habiendo que implantar varios metros de fibra para que cupiesen todos los requeridos. Nuestros estudios se centran ahora en una membrana que está hecha de un material similar pero que es más plana y por tanto nos permite empaquetar los islotes más juntos. Calculamos que una superficie del tamaño aproximado de un billete de mil pesetas podría contener 800.000 islotes; esto permitiría implantarla con facilidad en la cavidad abdominal. Esperamos hacer pronto pruebas iniciales de inocuidad en seres humanos. Si se encontrase un medio de aumentar la densidad todavía más, podríamos colocar juntos un par de estos artefactos bajo la piel, de donde podrían retirarse fácilmente si fuera necesario.

Pero antes de que la utilización de ninguno de estos remedios pueda generalizarse habrá que disponer de una abundante provisión de islotes. Los páncreas humanos de cadáveres son escasos, como los demás órga-

nos. Para hacerse una idea, el número de norteamericanos que tienen diabetes de tipo I es de unos 700.000 y se diagnostican más de 13.000 nuevos casos cada año. Hay además alrededor de dos millones de diabéticos de tipo II que reciben tratamiento con insulina. Frente a ello, son menos de 5000 los cadáveres que aportan órganos para trasplantes de cualquier tipo cada año, de los que sólo se recuperan unos mil páncreas.

Para remediar esta escasez se está investigando la posibilidad de implantar islotes de fetos abortados. Se trata de aislar las células precursoras, con la esperanza de poder inducirlas a producir islotes en cantidad, pero esta investigación está todavía en sus fases iniciales. Quizá llegue también el día en que los médicos puedan implantar solamente células productoras de insulina. Estas células podrían obtenerse de tumores de células β, que generan nuevas células indefinidamente en las placas de laboratorio. Ya existen tales líneas celulares, pero han perdido la capacidad de modular la cantidad de insulina que secretan en respuesta a la glucosa. Se está estudiando la forma de restablecer esta característica; hay que asegurarse también de que las células β trasplantadas no formarán tumores en el cuerpo del receptor.

De modo inmediato la alternativa lógica a los islotes humanos son los islotes de cerdo. Constituyen una opción muy atractiva porque se consiguen con facilidad y la insulina que producen es casi idéntica a la de los seres humanos. En previsión de su utilidad ya se dispone de métodos para extraerlos en cantidad. Si se les hace indetectables por el sistema inmunitario mediante la encapsulación, los trasplantes entre diferentes especies no deberían provocar el rechazo que sería de esperar en circunstancias normales. Es muy posible que, en el plazo de un par de años, se inicien los estudios clínicos relativos al injerto de islotes de cerdo encapsulados en pacientes que no reciban medicación inmunosupresora.

Este tipo de trasplante podría ser también útil para otras enfermedades, sobre todo las debidas a la falta de una hormona específica o de otra substancia segregada por las células. Las células implantadas podrían ser versiones sanas de las defectuosas o ser de un tipo diferente modificado genéticamente para que fabrique una molécula concreta. Los hemofílicos, por ejemplo, podrían beneficiarse de células capaces de producir los factores de coagulación sanguínea que les faltan. Los afectados por la enfermedad de Parkinson podrían hacerlo de células que fabricaran el neurotransmisor dopamina. La coordinación muscular de muchos de ellos mejora durante un tiempo gracias a la inyección de dopamina; estudios realizados en animales con enfermedad de Parkinson inducida experimentalmente han mostrado mejoras comparables al implantar fibras rellenas de células secretoras de dopamina cerca del área enferma del cerebro.

Del mismo modo que progresa la investigación sobre la encapsulación de islotes, también lo hace la referente a un sistema de administración de insulina completamente distinto: el páncreas artificial. Se trata de un instrumento mecánico miniaturizado, que supervisaría continuamente los niveles de glucosa y, en respuesta, liberaría la cantidad exacta de insulina necesitada en cada momento por el individuo. La dificultad todavía no superada ha sido en este caso la de diseñar un sensor que sea a la vez pequeño, duradero y preciso. No cabe duda de que se vencerá este obstáculo, como se hará con los que impiden el trasplante de islotes. En ambos casos, el éxito permitirá conseguir una regulación perfecta del azúcar en sangre desde una etapa muy precoz del curso de la diabetes, previniendo así las complicaciones que actualmente perturban tantas vidas humanas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

IMMUNOBIOLOGY OF TISSUE TRANSPLANTATION: A RETURN TO THE PASSENGER LEUCOCYTE CONCEPT. K. J. Lafferty, S. J. Prowse, C. J. Simenovic y H. S. Warren en *Annual Review of Immunology*, vol. 1, págs. 143-173; 1983.

AN ENCAPSULATED DOPAMINE-RELEASING POLYMER ALLEVIATES EXPERIMENTAL PARKINSONISM IN RATS. S. R. Winn, L. Wahlberg, P. A. Tresco y P. Aebischer en *Experimental Neurology*, vol. 105, n.º 3, págs. 244-250; septiembre de 1989.

PANCREATIC ISLET TRANSPLANTATION. Dirigido por Camillo Ricordi. R. G. Landes Company, 1992.

STATUS OF ISLET CELL TRANSPLANTATION. Paul E. Lacy en *Diabetes Care*, vol. 16, n.º 3, páginas 76-92; marzo de 1993.

PROTEIN PROTECTION OF ENCAPSULATED HUMAN ISLETS IMPLANTED WITHOUT IMMUNOSUPRESSION IN PATIENTS WITH TYPE I OR TYPE II DIABETES AND IN NONDIABETIC CONTROL SUBJECTS. David W. Scharp, Carol J. Swason, Barbara J. Olack, Paul P. Latta, Orion D. Hegre, Edward J. Doherty, Frank T. Gentile, Karen S. Flavin, Maha F. Ansara y Paul E. Lacy en *Diabetes*, vol. 43, n.º 9, páginas 1167-1170; septiembre de 1994.



INVESTIGACION Y CIENCIA

ha publicado sobre el tema, entre otros, los siguientes artículos:

Bosques de inundación amazónicos, de Michael Goulding
Mayo 1993

Ecología de los ríos mediterráneos, de Sergi Sabater, Francesc Sabater y Joan Armengol
Agosto 1993

Archivos subterráneos del clima cambiante, de Henry N. Pollack y David S. Chapman
Agosto 1993

¿El libre comercio daña el ambiente?, debate entre Jagdish Bhagwati y Herman Daly
Enero 1994

Lluvia ácida sobre España, de E. Hernández, J. Piorno, M. T. del Teso y J. Díaz
Febrero 1994

Humedales, de Jon A. Kusler, William J. Mitsch y Joseph S. Larson
Marzo 1994

Aerosol de sulfatos y cambio climático, de Robert J. Charlson y Tom M. L. Wigley
Abril 1994

La salud del mar Mediterráneo, de Joandomènec Ros
Agosto 1994



Prensa Científica, S.A.

La luz de los fondos marinos

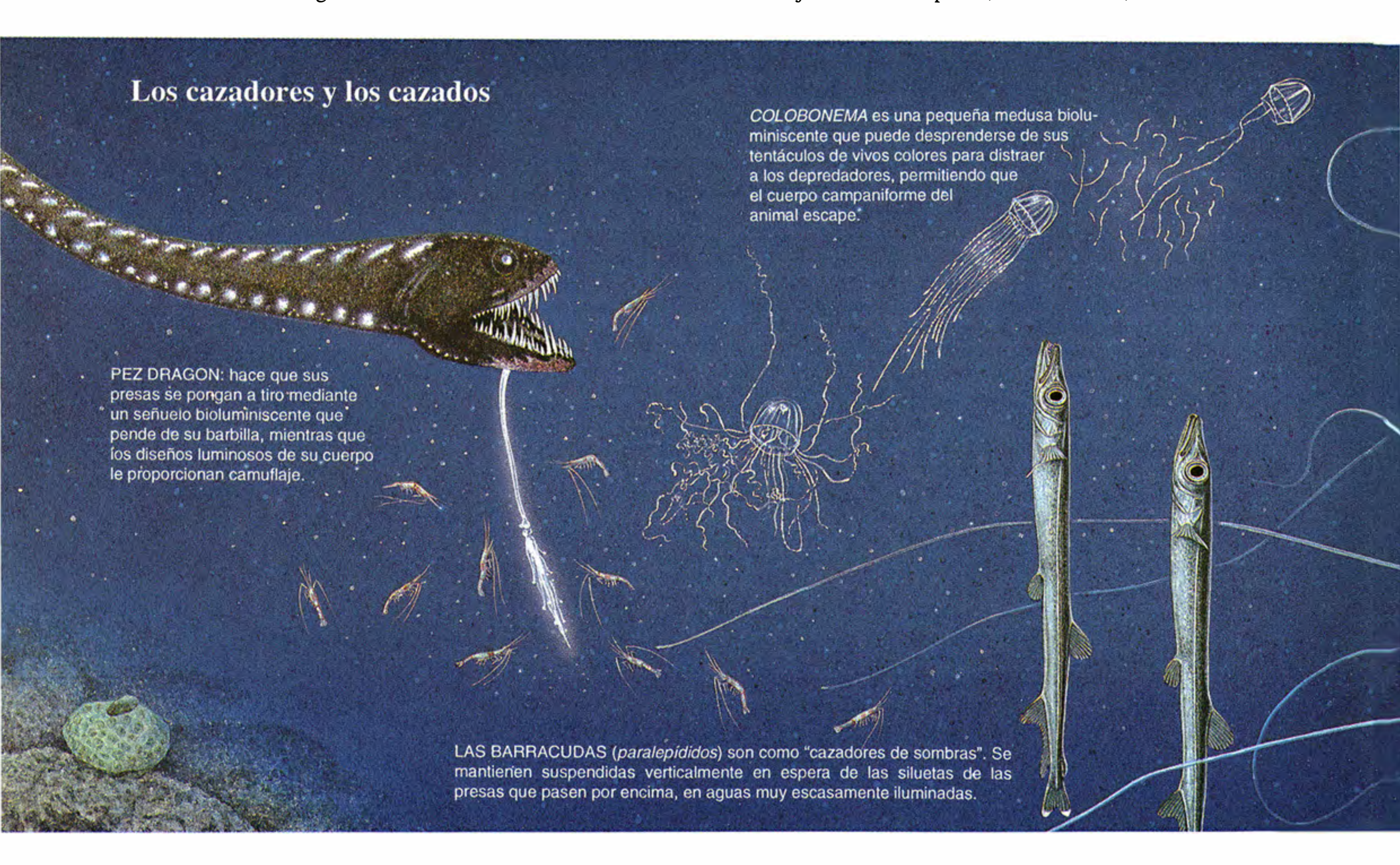
Bajo la superficie de los mares
la luz solar se extingue poco a poco.
En la oscuridad resultante vive una multitud de animales bioluminiscentes

Bruce H. Robison

El hábitat animal más extenso de la Tierra se encuentra entre la superficie del mar y el fondo de las cuencas oceánicas profundas. En este enorme volumen de agua viven las mayores y quizá las más notables comunidades biológicas de todo el planeta. Esta región es tan ajena a la experiencia normal del hombre que todavía conocemos poquísimo sobre su fauna, si bien las investigaciones sobre la naturaleza y el comportamiento de organismos tan inusuales progresan continuamente. Durante los últimos años he podido explorar, junto con mis colegas del Instituto de Investigación del Acuario de la Bahía de Monterrey, el océano que se extiende por debajo de las soleadas aguas superficiales y examinar la ecología local, gracias a la nueva perspectiva que las modernas técnicas oceanográficas hacen posible. Y, como suele suceder cuando se consigue ver algo desde una posición ventajosa completamente nueva, este mundo submarino resulta ser muy distinto de lo que habíamos imaginado.

Mis estudios de la biología de las aguas intermedias del océano (una zona que se extiende desde aproximadamente los 100 metros hasta unos cuantos kilómetros bajo la superficie) se han limitado a la zona menos profunda, o mesopelágica, y son el resultado de incontables horas pasadas a bordo del *Deep Rover*, un submarino de investigación de un solo tripulante. De manera menos arriesgada, pero igualmente eficaz, me ha servido de mucho un vehículo operado a distancia llamado *Ventana*, una plataforma maniobrable y computerizada del tamaño de un automóvil pequeño, que está equipada con un arsenal de cámaras, instrumentos, sensores y muestreadores.

Estos dos vehículos submarinos pueden alardear de posibilidades que superan, con mucho, a las de los



COLOBONEMA es una pequeña medusa bioluminiscente que puede desprenderse de sus tentáculos de vivos colores para distraer a los depredadores, permitiendo que el cuerpo campaniforme del animal escape.

PEZ DRAGON: hace que sus presas se pongan a tiro mediante un señuelo bioluminiscente que pende de su barbilla, mientras que los diseños luminosos de su cuerpo le proporcionan camuflaje.

LAS BARRACUDAS (*paralepídidos*) son como "cazadores de sombras". Se mantienen suspendidas verticalmente en espera de las siluetas de las presas que pasen por encima, en aguas muy escasamente iluminadas.

instrumentos relativamente toscos en los que se basaba la investigación anterior de las aguas profundas. Así, por ejemplo, el biólogo marino Eric G. Barham, de la Universidad de Stanford, examinó también el océano próximo a la bahía de Monterrey por los años cincuenta, pero en aquella época no podía utilizar más que el sonar y redes barrederas arrastradas por un barco para identificar y seguir los movimientos de la fauna de las aguas mesopelágicas. En el curso de sus estudios pioneros descubrió un conjunto bastante limitado de animales (camarones, peces linterna, calamares y quetognatos) y determinó las pautas generales de sus migraciones verticales, desde profundidades de alrededor de 300 metros durante el día hasta las capas superficiales durante la noche.

Estos medios técnicos rudimentarios hicieron que a Barham se le escapasen muchos detalles del océano, por la simple razón de que no pudo observarlos directamente. Con el *Deep Rover* y el *Ventana* mis colegas y yo hemos descubierto que las aguas mesopelágicas contienen una variedad de organismos muy superior a la que él hubiera podido capturar con sus redes, pues algunos son tan frágiles que no se les puede extraer del ambiente acuático que los sostiene. Y, sin embargo, hemos llegado a la conclusión de que, desde muchos puntos de vista, esta delicada vida marina es lo que *constituye* gran parte de ese ambiente de aguas mesopelágicas.

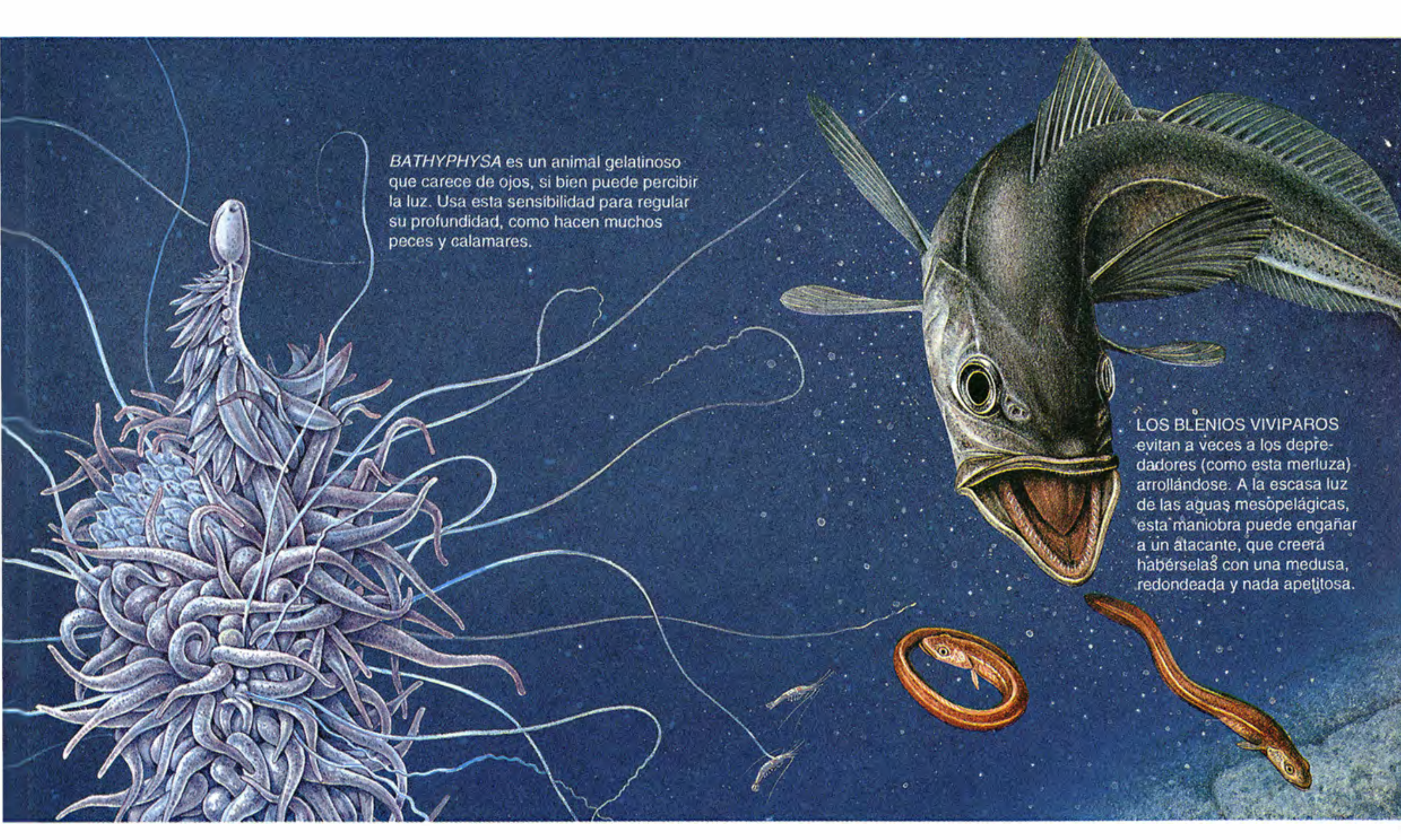
En esta región abundan los elementos biológicos de gran tamaño, entre los que destacan los cuerpos de animales gelatinosos, junto a sus amplias estructuras alimentarias y a las partes corporales desechadas. Los ejemplos más sorprendentes de la bahía de Monterrey son los sifonóforos alargados, conjuntos lineales que pueden extenderse hasta 40 metros, lo que los coloca entre los animales más largos de la Tierra. No está claro si ha de considerárseles como colonias organizadas de individuos o como un único superorganismo complejo. Yo los tomo por redes barrederas vivas.

Otro componente habitual del telón de fondo biológico de las aguas mesopelágicas son los filtros alimentarios, semejantes a globos, de los animales llamados apendicularias. El más notable es el de una forma gigante, *Bathochordaeus*, un animal que segrega láminas mucosas que a un observador subacuático le parecen islas flotantes. Debido a que son muchos los organismos de esta zona que se desprenden regularmente de tales estructuras alimentarias y de otras partes de sus cuerpos, a veces las aguas están atestadas de ellas.

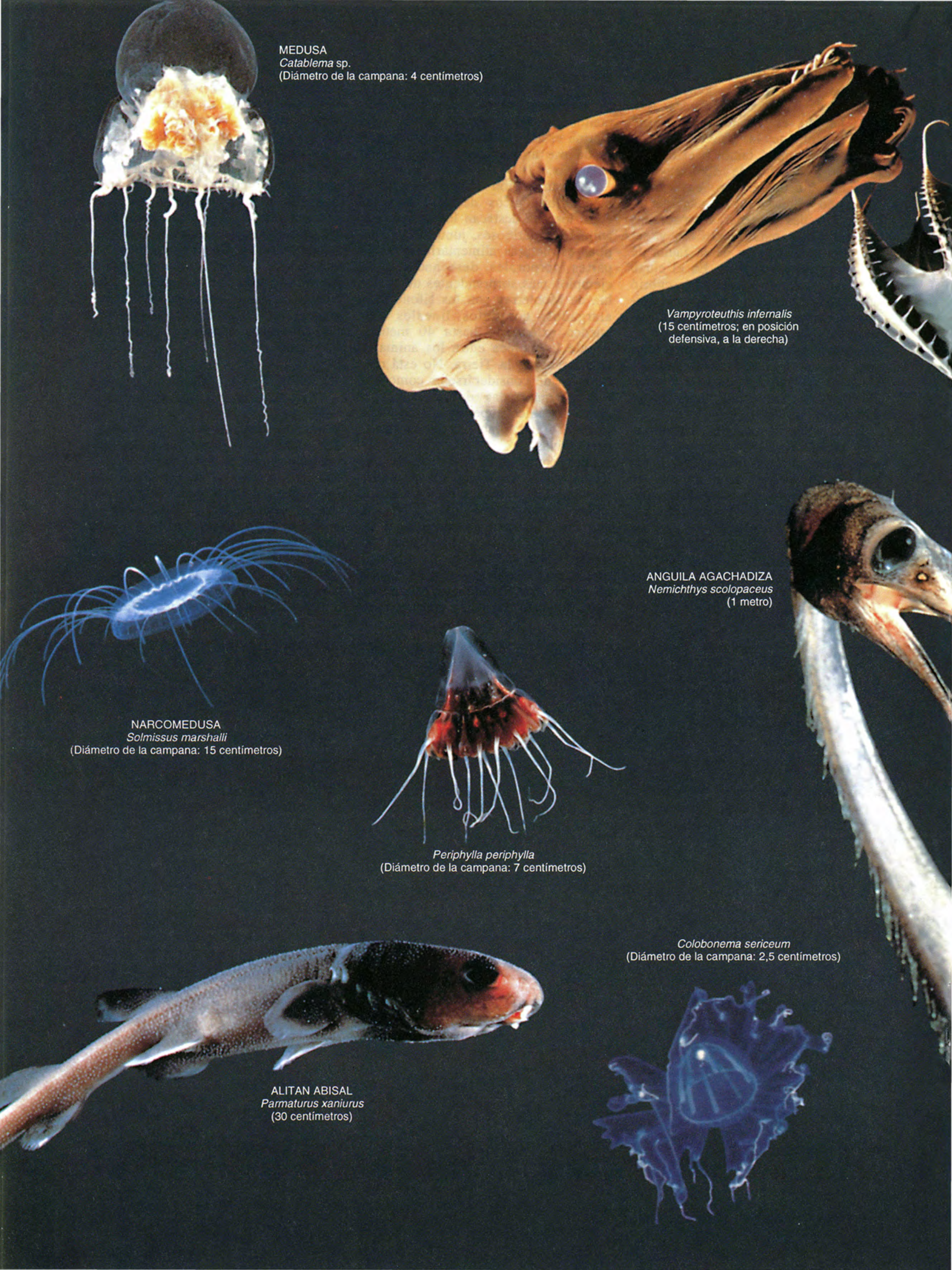
La mejor manera de imaginarse el ambiente de las aguas mesopelágicas quizá sea como un mundo oscuro, ingrávido, lleno de telarañas tridimensionales hechas jirones. Son muchos los descubrimientos sorprendentes que hemos realizado durante nuestras exploraciones por este reino de andrajos, pero puede que el resultado más interesante de nuestros esfuerzos por sondear las tinieblas del océano haya sido el darnos cuenta del papel que desempeña la luz.

La vida en la zona crepuscular

Durante muchos años los biólogos marinos creyeron que la luz del sol sólo podía penetrar unos 300 o 400 metros bajo la superficie de las aguas antes de que se debilitara tanto que no permitiera ver. Esta creencia se mantenía a pesar de que sabían perfectamente que había peces y calamares de ojos grandes y bien desarrollados viviendo a profundidades mayores. Ahora que hemos podido observar a los habitantes de estas zo-


BATHYPHYSA es un animal gelatinoso que carece de ojos, si bien puede percibir la luz. Usa esta sensibilidad para regular su profundidad, como hacen muchos peces y calamares.

LOS BLENIOS VIVIPAROS evitan a veces a los depredadores (como esta merluza) arrollándose. A la escasa luz de las aguas mesopelágicas, esta maniobra puede engañar a un atacante, que creerá habérselas con una medusa, redondeada y nada apetitosa.



MEDUSA
Catablema sp.
(Diámetro de la campana: 4 centímetros)

Vampyroteuthis infernalis
(15 centímetros; en posición defensiva, a la derecha)

ANGUILA AGACHADIZA
Nemichthys scolopaceus
(1 metro)

NARCOMEDUSA
Solmissus marshalli
(Diámetro de la campana: 15 centímetros)

Periphylla periphylla
(Diámetro de la campana: 7 centímetros)

Colobonema sericeum
(Diámetro de la campana: 2,5 centímetros)

ALITAN ABISAL
Parmaturus xaniurus
(30 centímetros)



1. ANIMALES DE LAS AGUAS MESOPELAGICAS. Adoptan formas diversas, que reflejan sus distintas maneras de adaptarse al ambiente. Muchos peces, calamares y criaturas gelatinosas pueden producir y percibir algo de luz. Qué papel desempeñe esta iluminación es asunto que, en buena medida, sigue siendo un misterio escondido en las tenebrosas profundidades del océano. (Entre paréntesis se indica el tamaño aproximado de las especies ilustradas.)

Exploración de las aguas mesopelágicas con cámara y robot

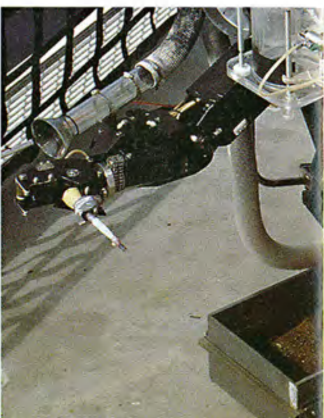
El sumergible *Deep Rover* permite que un único ocupante penetre en el océano hasta un kilómetro de profundidad y durante un tiempo de hasta ocho horas seguidas. El piloto tiene una vista panorámica de las aguas circundantes gracias a que su alojamiento es transparente, al ser una gran esfera acrílica de 160 centímetros de diámetro y 13 centímetros de espesor. Bajo ella se encuentran ristras de baterías eléctricas de plomo y ácido, que suministran la energía necesaria para la iluminación, la propulsión, los brazos manipuladores hidráulicos del vehículo y sus otros muchos instrumentos científicos, de navegación y de supervivencia.

En cambio el *Ventana* no es un submarino, como el *Deep Rover*, sino un vehículo no tripulado operado a distancia. Quienes lo gobieman se comunican con el robot subacuático a través de un cable que lo conecta con su barco nodriza. La energía eléctrica requerida para las luces, los impulsores y el resto del equipo se suministra continuamente mediante este cordón umbilical, al tiempo que los datos e imágenes recogidos viajan hacia arriba a través de las fibras ópticas del cable. Velando frente a los monitores de una consola de a bordo, los científicos y los pilotos controlan los movimientos del *Ventana* y pueden, si es necesario, mantener las



***DEEP ROVER* es un vehículo sumergible. Aquí lo vemos balanceándose sobre la superficie del mar antes de una inmersión.**

MOMENTO en que *Ventana* emerge del mar, levantado por una grúa de su buque nodriza *(izquierda)*. La parte frontal de su estructura sostiene cámaras, sensores, muestreadores y un brazo mecánico *(abajo, centro)*. Un piloto y un investigador operan juntos el vehículo desde una sala de control a bordo del barco nodriza *(abajo, derecha)*.



nas supuestamente oscuras del océano, resulta claro que estos animales aprovechan la reducidísima cantidad de luz que consigue filtrarse hasta las profundidades en que moran.

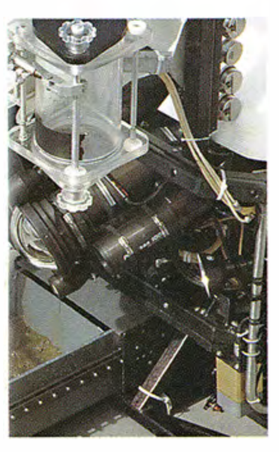
Hasta que no tuve la oportunidad de escudriñar este mundo por mí mismo no pude empezar a darme cuenta de cómo es realmente el hábitat de las aguas mesopelágicas. Encontrándome solo en el *Deep Rover*, sumergido más de medio kilómetro bajo la superficie, muchas veces apago todas las luces del submarino y observo la oscuridad que rodea la transparente esfera que es el habitáculo del vehículo. Una vez que mis ojos se han adaptado por completo a la oscuridad todo lo que puedo percibir es que hacia arriba el mar es algo menos oscuro que hacia abajo. Muchos biólogos marinos aceptan ahora, sin embargo, que numerosos animales deben utilizar esta sutil diferencia. Nos hemos dado cuenta además de que en este mundo crepuscular abundan los organismos capaces de aumentar la reducida luz que les llega con otra forma de iluminación natural, la bioluminiscencia.

Aunque la bioluminiscencia sea un fenómeno relativamente raro en los ecosistemas terrestres, la mayoría de los animales que viven en el kilómetro superior del océano produce luz de una u otra forma. Por si fuera poco, gran parte de la materia particulada y de los detritos biológicos que flotan suspendidos en estas aguas resplandece tras una perturbación física. La normal oscuridad del océano profundo se ve así interrumpida por una luz espectral.

Los animales de las aguas mesopelágicas emplean la bioluminiscencia de mil maneras distintas. Los hay que la usan como alarma contra ladrones y recubren a un depredador que se aproxima con un tejido pegajoso y luminiscente que hace que el atacante en potencia sea vulnerable a otros cazadores que se guían por la vista; es como si los ladrones de banco quedasen marcados por la explosión de paquetes de colorante escondidos entre el dinero robado. Otros la utilizan como camuflaje. El resplandor generado por órganos productores de luz, llamados fotóforos, situados en la parte ventral de algunos peces y calamares actúa contrasombreándolos: la débil iluminación hacia abajo elimina efectivamente la sombra que el animal produce cuando se le observa desde una posición inferior contra las iluminadas aguas superiores.

Los calamares mesopelágicos *Chiroteuthis* y *Galiteuthis* son un ejemplo claro de este uso de la bioluminiscencia. Su cuerpo es transparente, excepción hecha de sus ojos y de la bolsa de la tinta, que son densos. Ornados órganos luminosos dispuestos bajo estas estructuras opacas bri-







tareas de investigación subsuperficial del vehículo durante las veinticuatro horas del día.

El ingenio porta dos cámaras de vídeo, una en blanco y negro y otra en color. Además puede emplearse un sistema de sonar de barrido para "escudriñar" los alrededores mediante ondas sonoras de alta frecuencia. Guiados por estos dispositivos, los científicos pueden tomar medidas y realizar experimentos utilizando una gran variedad de instrumentos, según se requiera. Entre ellos se incluyen inyectores de colorantes (para seguir la pista de corrientes tenues), un transmisómetro (para medir la claridad óptica) y una serie de luces estructuradas (para cartografiar la densidad de partículas). También pueden capturarse y recuperarse objetos de interés con varios tipos de aparatos. Por ejemplo, cuatro muestreadores de detritos aprisionan fácilmente especímenes pequeños y delicados, mientras que un muestreador de succión puede absorber animales gelatinosos extensos.

Se está construyendo en el Instituto de Investigación del Acuario de la Bahía de Monterrey, en California, un nuevo vehículo, llamado *Tiburón*, que será todavía más versátil que el *Ventana*. Los ingenieros del Instituto diseñan y construyen además prototipos de vehículos subacuáticos autónomos. En los años venideros, estos robots móviles podrán realizar misiones de investigación de larga duración sin la necesidad de una presencia (o telepresencia) humana constante, como la que actualmente se requiere para las operaciones del *Deep Rover* y el *Ventana*.

llan para contrasombrearlas, sea cual sea la posición del calamar: cabeza arriba o cabeza abajo, vertical o invertida. Resulta un poco desconcertante mirar directamente a los ojos a un animal que puede hacer girar su cuerpo alrededor de un ojo rígido que ni parpadea ni cambia de orientación.

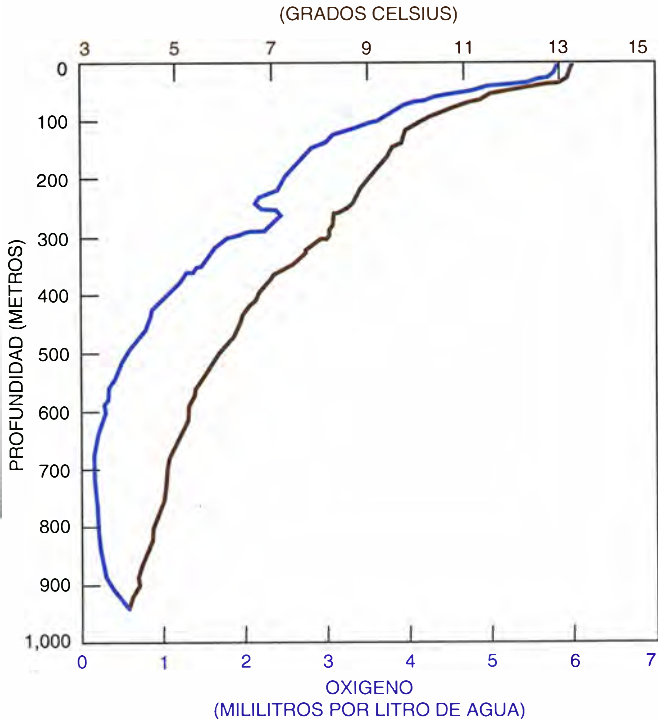
Aunque comprendamos la utilidad del contrasombreado, la de otros ejemplos de bioluminiscencia se nos escapa. Uno de tales enigmas es el que plantea una especie recientemente descubierta de gusano tomoptérido, un nadador activo y ágil que posee multitud de pares de patas a lo largo de su cuerpo acintado. Merced a ejemplares capturados con redes se sabía que hay animales que poseen órganos luminosos estructurados en los extremos de sus patas, pero el año pasado James C. Hunt y yo encontramos una nueva forma de exhibición bioluminiscente en un tomoptérido que tiene poros pigmentados en el mismo sitio más o menos que los típicos fotóforos de las patas. Esta especie es un "vomitador": cuando se le incita, arroja un chorro de fluido bioluminiscente por cada uno de sus poros. La descarga forma una nube luminosa que rodea completamente el cuerpo del gusano o deja un rastro resplandeciente a medida que se aleja nadando. Cada gota del fluido expulsado contiene cientos de bastoncillos que resplandecen con una luz amarilla brillante.

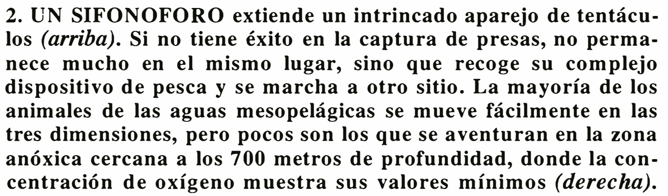
Se conocen otros tipos de vomitadores; se supone que su estrategia consiste en provocar una distracción visual. Pero esta especie es un enigma. ¿Qué finalidad tiene la exhibición? ¿Por qué tienen forma de bastoncillo las diminutas luminarias? ¿Por qué la luz que se emite es de color amarillo cuando los ojos de la mayoría de los animales de las aguas mesopelágicas sólo son sensibles al verde-azul?

Otras aplicaciones misteriosas de la bioluminiscencia se refieren a la materia particulada en suspensión y a la mayoría de los animales gelatinosos de mayor tamaño, que producen luz tras un estímulo mecánico. El "centelleo de contacto" puede llegar a afectar a una gran zona de este entorno normalmente oscuro. La mayor parte del tiempo todo está tranquilo y los numerosos centelleadores permanecen en reposo en la oscuridad. Pero la perturbación que representa el movimiento del *Deep Rover* por estas aguas puede provocar una andanada de destellos y hacer que parezca una sesión de fuegos artificiales.

También los movimientos naturales de los animales pueden hacer que la iluminación biológica ambiental se dispare. Cuando estas respuestas bioluminiscentes se producen a gran escala se origina uno de los espectáculos más notables en las aguas







2. UN SIFONOFORO extiende un intrincado aparejo de tentáculos *(arriba)*. Si no tiene éxito en la captura de presas, no permanece mucho en el mismo lugar, sino que recoge su complejo dispositivo de pesca y se marcha a otro sitio. La mayoría de los animales de las aguas mesopelágicas se mueve fácilmente en las tres dimensiones, pero pocos son los que se aventuran en la zona anóxica cercana a los 700 metros de profundidad, donde la concentración de oxígeno muestra sus valores mínimos *(derecha)*.

mesopelágicas: una exhibición propagada. Este fenómeno empieza con un movimiento localizado que hace que los centelleadores de contacto se disparen; estos destellos desencadenan a su vez más destellos en las aguas circundantes, como un eco. Animales que antes estaban suspendidos empiezan a moverse cuando el entorno se ilumina y sus estelas originan más luz. Si los destellos se producen dentro de una densa capa de partículas, el efecto acumulativo de esta actividad bioluminiscente puede parecerse a los relámpagos de una nublada noche de estío. Sea cual fuere la finalidad que tenga el destello de contacto de los organismos más simples, los animales más desarrollados de las aguas mesopelágicas parecen haberse adaptado bien a la situación.

Atacantes mesopelágicos

Hay peces, como la merluza, y ciertos calamares que son depredadores de movimientos rápidos y de amplio alcance, pero a los que les gusta demorarse cerca del *Ventana*, atraídos por las luces del ingenio. Puede que las aguas iluminadas les lleven a la errónea conclusión de que por allí hay presas móviles. Quizás estén condicionados por las excursiones diarias de especies que huyen de la luz del sol y que sólo se aventuran cerca de la superficie durante la noche. Tales migraciones verticales deben ser acontecimientos que provoquen iluminación, pues los animales han de atravesar capas de centelleadores de contacto. Puede que el potencial de bioluminiscencia inducida por el movimiento inhiba la actividad general y mantenga el ambiente mesopelágico relativamente estático. Evitar espectáculos luminosos innecesarios, que descubrirían su posición, puede que sea la razón por la que los animales móviles suelen permanecer "estacionados" en un sitio durante mucho tiempo.

Hay algunos depredadores que permanecen casi siempre inmóviles. Por ejemplo, los paralepídidos o barracudinas (peces gráciles y veloces, cuyo cuerpo parece que estuviera hecho de mercurio) pasan las horas del día en posición vertical sobre su cola, con el agudo hocico dirigido hacia arriba y sus grandes ojos observando las aguas superiores. Creemos que esperan a que aparezcan las siluetas de sus presas contra la tenue luminosidad del fondo. El pez hacha *Argyropelecus* es otro de estos cazafantasmas; posee una quilla pronunciada que mantiene su cuerpo horizontal y estabiliza un par de ojos tubulares situados en la parte superior de la cabeza, de modo que su visión se dirige hacia arriba. *Argyropelecus* vive entre los 300 y los 600 metros bajo la superficie, donde la luz debe ser suficiente para producir sombras perceptibles. Pero un pariente cercano suyo, *Sternoptyx*, que vive a profundidades demasiado grandes para emplear esta táctica, tiene ojos más pequeños y que miran normalmente hacia los lados.

Hay más pruebas de que la débil luz solar que llega a la zona mesopelágica es lo suficientemente intensa como para guiar a los depredadores: muchos animales que viven a estas profundidades son transparentes. El aspecto que tienen (o mejor, que no tienen) es una buena protección en este ambiente monocromático y de poca luz. Otro mecanismo de defensa óptica consiste en tener el pigmento corporal rojo, pues absorbe la luz disponible, que es verde-azul, y no refleja nada.

No ha de sorprender que estos trucos ópticos funcionen con eficacia. El régimen visual de la zona mesopelágica es parecido a lo que se ve a través de una cámara de vídeo de seguridad. El rango de color es reducido; la sensibilidad es alta, pero la resolución es poca, y la direccionalidad de la luz produce una imagen plana. El ojo humano no ve más que un conjunto tosco de siluetas y sombras. En este ambiente de escasa luz sólo parece haber cuatro formas básicas: bandas, glóbulos, cordones y manchas. Cada uno de estos fantasmas caracteriza a un determinado tipo de sujeto. Las bandas corresponden a peces y calamares. Los glóbulos redondeados o amorfos suelen ser animales gelatinosos, del tipo de medusas y ctenóforos, o las estructuras reticulares mucosas de las apendicu-

larias. El material filamentoso suele ser mucus que se hunde o colas de sifonóforos. En fin, las manchas son o diminutos componentes del zooplancton o partículas de materia orgánica difusa, denominadas nieve marina.

Dentro de este marco de referencia hay una pauta de comportamiento bastante común, empleada por muchos animales, consistente en que cuando se asustan o son amenazados, cambian su forma aparente, por lo general de alargada a redondeada. Peces tales como los blenios vivíparos (zoárcidos) se arrollan en círculo y penden inmóviles en el agua. Creo que este comportamiento es una forma de mimetismo: cambian de aspecto para parecer objetos no comestibles. Desde el *Deep Rover* he visto a merluzas atacar a peces en movimiento al tiempo que no hacían caso de otros que se habían arrollado cerca. Es probable que así parezcan medusas, animales de valor nutritivo relativamente bajo y que disuaden a los depredadores con tentáculos urticantes. No todos mis colegas aceptan esta hipótesis, pero puedo aducir en favor de la utilidad del cambio de forma el hecho de que no suele observarse a mayores profundidades (donde la luz es insuficiente para crear imágenes, incluso groseras). A mí por lo menos me ha engañado en más de una ocasión.





3. *APOLEMIA* es una criatura gelatinosa y alargada *(abajo)*, a la que cabe considerar como una colonia o como un superorganismo. Las líneas semicirculares de referencia de un registro de sonar *(arriba)* representan intervalos de 10 metros. Se ve así que estas "redes de deriva vivas" pueden llegar a tener una longitud de 40 metros, estando entre los animales más largos conocidos.

Luz para los ciegos

La mayoría de los animales gelatinosos, como las medusas, carecen de ojos, por lo que no pueden formar imágenes de ningún tipo. No obstante, algunos son claramente sensibles a las luces del *Ventana*, incluso a distancia, y muestran una ligera aversión por ellas. Estamos acumulando pruebas de que esta sensibilidad a la luz puede que regule la profundidad del animal durante el día. Se sabe que los niveles cambiantes de luz controlan las migraciones matutinas y vespertinas de peces y de *krill*, por lo que no sería imposible que incluso animales carentes de ojos percibiesen de algún modo la presencia del sol sobre ellos.

Sirva como ejemplo de esta sensibilidad a la luz nuestro encuentro con un animal llamado *Bathyphysa*. Este extraño organismo, que tiene unos dos metros de longitud, ha aparecido una sola vez ante las cámaras del *Ventana*, mientras el vehículo navegaba a 500 metros bajo la superficie del mar. Cuando se acercó a él, el pedúnculo del animal se hallaba vertical, con su "neumatóforo" lleno de gas en la parte superior. El pedúnculo de *Bathyphysa* posee una melena de estómagos alargados y consecutivos (llamados gastrozoides), cada uno de los cuales tiene una boca en su extremo, agitándose todos como serpientes. Varios tentáculos, de cinco a diez metros de longitud, radiaban desde una parte redondeada y contraída del pedúnculo central. El pedúnculo era excepcionalmente elástico, rasgo que pareció explicarse cuando descubrimos la respuesta de huida del animal. Al notar las luces del aparato, empezó a realizar una serie de contracciones y relajaciones pulsantes de la parte superior del pedúnculo, lo que tuvo como efecto el impulsarlo hacia abajo. Al unísono con estas pulsaciones, los gastrozoides se iban desprendiendo de uno en uno y se alejaban de la colonia. El resultado fue un descenso perceptible, aunque muy lento y agotador.

Episodios como éste hacen pensar que incluso los animales sin ojos pudieran percibir la luz, aunque sea mortecina. En cualquier caso, es evidente que pueden generarla. *Colobonema*, por ejemplo, es una medusa iridiscente, pequeña y hermosa, cuya "campana" tiene aproximadamente el tamaño de una moneda. Bajo los focos del vehículo, las bandas musculares de la campana tienen un brillo verdiazul metálico. Los tentáculos de la medusa son de color azul oscuro a lo largo de toda su longitud y de color blanco brillante en la punta.

Un individuo completamente desarrollado posee 32 tentáculos dispuestos uniformemente alrededor de la base de la campana. Sin embargo, no son infrecuentes los ejemplares que tienen menos apéndices y situados en hileras de longitud diversa. Quizás este aspecto se explique por el comportamiento del animal: cuando se asusta, *Colobonema* sale disparada, dejando una estela de brillantes tentáculos que serpentean. Desde el *Deep Rover* he observado que esta liberación suele verse precedida por ráfagas de luminiscencia que pulsan rápidamente a través de la campana. Después se desprende la multitud de tentáculos, al tiempo que la campana se oscurece y se aleja zigzagueando hacia la oscuridad que todo lo rodea.

Con el mínimo de oxígeno

Uno de los rasgos característicos del océano Pacífico cerca de la bahía de Monterrey es la existencia de una zona deficitaria en oxígeno disuelto. Inmediatamente debajo de la superficie del mar las concentraciones de oxígeno se hallan cercanas a la saturación (es decir, el agua contiene todo el oxígeno que puede tener en disolución) pero, a medida que la profundidad aumenta, la cantidad de oxígeno disminuye. A unos 700 metros de profundidad la concentración cae hasta un valor que es

BRUCE H. ROBISON desarrolló pronto su curiosidad por el océano, pues creció en la playa en el sur de California. Licenciado por la Universidad de Purdue y diplomado por el Instituto de Ciencias Marinas de Virginia, se doctoró en la Universidad de Stanford en 1973. Después pasó dos años de formación posdoctoral en la Institución Oceanográfica de Woods Hole, en Massachusetts, antes de acceder a la Universidad de California en Santa Bárbara. En 1987 se incorporó al entonces recién fundado Instituto de Investigación del Acuario de la Bahía de Monterrey, en Pacific Grove, California, donde en la actualidad es investigador principal y dirige un departamento de investigación. La investigación de Robison de la ecología del mar profundo lo ha llevado por todo el Pacífico, el Atlántico y el gran océano Austral que rodea la Antártida. Dirigió el primer grupo de científicos formados como pilotos de sumergibles y hace mucho tiempo que promueve la construcción de vehículos submarinos avanzados para la investigación oceanográfica.

sólo la trigésima parte del que hay cerca de la superficie. Por debajo de este nivel existe una marcada transición entre una capa de agua relativamente clara y otra lechosa, debido a la presencia de partículas muy pequeñas. La capa lechosa tiene una cantidad de oxígeno moderada y a 1000 metros la concentración es todavía mayor. Pero en la zona de menor concentración de oxígeno, hacia los 700 metros, reside un grupo único de animales, que se han adaptado a resistir los retos fisiológicos que supone la anoxia casi total.

Uno de los habitantes más curiosos de esta zona es el cefalópodo arcaico *Vampyroteuthis infernalis*, un pariente lejano de pulpos y calamares. Un *Vampyroteuthis* grande tiene el tamaño y la forma de una pelota de rugby blanda. Su cuerpo es de color pardo aterciopelado, con grandes ojos que brillan como ópalos azules a la luz de los focos del *Ventana*. Cerca del extremo del manto cónico y rechoncho hay dos aletas redondeadas y dos grandes órganos luminosos con obturadores parecidos a iris. *Vampyroteuthis* tiene ocho tentáculos, como un pulpo, pero unidos por una una amplia membrana. Además de ventosas, los brazos portan una serie de protrusiones pares y digitiformes, denominadas cirros, que surgen hacia dentro. *Vampyroteuthis* posee asimismo dos apéndices adicionales: filamentos sensoriales largos y elásticos que se retiran a unas bolsas situadas a cada lado entre los brazos tercero y cuarto.

Se puede considerar que este animal es un fósil viviente, un representante moderno de los cefalópodos que precedieron la escisión evolutiva entre animales de ocho y de diez brazos. *Vampyroteuthis* se propulsa con chorros de agua expelidos por su sifón, al tiempo que bate sus aletas. En el centro de sus brazos palmeados hay un pico ganchudo y oscuro. Todavía no sabemos qué come, pero sí sabemos que reduce mucho sus probabilidades de ser comido al vivir en una zona inhóspita, por anóxica, del océano.

También hemos descubierto que este extraño animal posee un órgano bioluminiscente en el extremo de cada uno de sus brazos. De alguna manera, *Vampyroteuthis* usa estas fuentes de luz levantando sus brazos palmeados sobre el manto, lo que sitúa ventosas y cirros hacia afuera y cambia su aspecto, de una pelota de rugby a una piña americana espinosa con un ápice luminiscente.

Esta maniobra cubre sus ojos, aunque parece que la membrana situada entre los brazos es lo suficientemente tenue para que *Vampyroteuthis* pueda seguir viendo a su través. Hemos observado muchas veces esta transformación, pero no sabemos explicar la utilidad que pueda tener comportamiento tan insólito.



4. HACHA DE PLATA. ***Sternoptyx diaphana*** **(de 2,5 a 9 cm).**

Exploración y tecnología

La longitud del cable actual del *Ventana* permite explorar un volumen de agua de un kilómetro de profundidad. La resolución visual se extiende desde aproximadamente un centímetro hasta varios cientos de metros. Aunque esta gama abarca una gran porción de las especies mesopelágicas de la región, todavía hay muchas medidas que no podemos tomar. Los ingenieros de nuestro instituto trabajan para modificar esta situación, preparando avances técnicos que nos han de permitir sondear a profundidades aún mayores, en la zona batipelágica y más allá. Pronto nuevos sistemas de sensores ópticos y acústicos nos dejarán examinar mayores volúmenes desde mayores distancias, con lo que podremos establecer con mayor fiabilidad la distribución de los animales mesopelágicos.

Puede que algún día lleguemos a disponer de sondas autónomas, que dejen cámaras automáticas de disparo intermitente en los lugares apropiados, para que podamos realizar el seguimiento de animales de movimiento lento, durante las veinticuatro horas del día y durante varios días seguidos. Vehículos robóticos de natación rápida seguirán a los animales móviles, lo que nos permitirá observar mejor sus pautas de alimentación y de migración. Las posibilidades de investigación parecen infinitas. De ahí que, a pesar de los numerosos descubrimientos ya realizados, hayamos de considerar que nuestras investigaciones submarinas no han hecho más que empezar: las profundidades del océano son inmensas y queda todavía mucho por explorar.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DEVELOPMENTS IN DEEP-SEA BIOLOGY. Norman B. Marshall. Blandford Press, 1979.

BIOLUMINISCENCE IN THE MONTEREY SUBMARINE CANYON: IMAGE ANALYSIS OF VIDEO RECORDINGS FROM A MIDWATER SUBMERSIBLE. E. A. Widder, S. A. Bernstein, D. F. Bracher, J. F. Case, K. R. Reisenbichler, J. J. Torres y B. H. Robison en *Marine Biology*, vol. 100, n.º 4, págs. 541-551; 1989.

KIYOHIMEA USAGI, A NEW SPECIES OF LOBATE CTENOPHORE FROM THE MONTEREY SUBMARINE CANYON. G. I. Matsumoto y B. H. Robison en *Bulletin of Marine Science*, volumen 51 n.º 1, páginas 19-29; julio de 1992.

MIDWATER RESEARCH METHODS WITH MBARI'S ROV. Bruce H. Robison en *Marine Technology Society Journal*, vol. 26, n.º 4, págs. 32-39; invierno de 1992.

NEW TECHNOLOGIES FOR SANCTUARY RESEARCH. Bruce H. Robison en *Oceanus*, volumen 36, n.º 3, páginas 75-80; otoño de 1993.

John Horgan

STEPHEN JAY GOULD: *Escurridizo como un calamar*

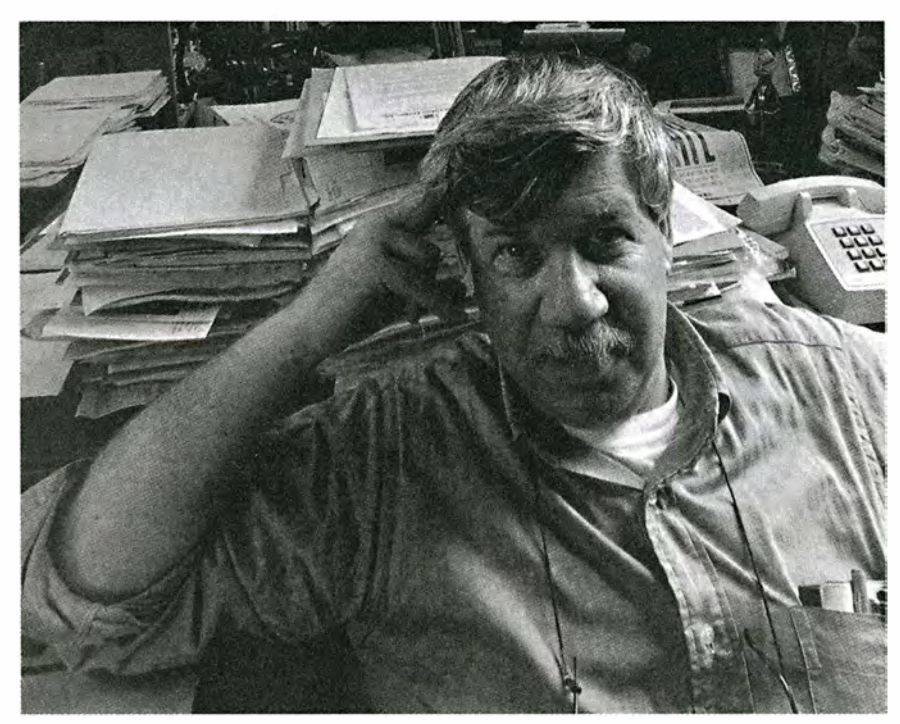
Cuando me entrevisto con Gould, teórico de la evolución, autor mundialmente famoso y profesor de la Universidad de Harvard desde 1967, lo hacemos en su casa de Nueva York, la ciudad donde nació y pasó sus primeros años. Entra vestido con unos pantalones caqui y una camisa de algodón, la viva imagen del profesor desaliñado. Ha vetado las preguntas personales, pero eso no importa mucho porque lo que verdaderamente me interesa es su talante intelectual. La mayoría de los científicos se encuentran a gusto demostrando que la realidad es de alguna manera necesaria, inevitable, pero Gould, que ahora tiene 53 años, ha insistido durante su carrera en que literalmente nada es inevitable. Se recrea en el azar o, para usar su término preferido, en la contingencia.

Gould empezó a labrarse su fama, allá por los años sesenta, atacando la venerable doctrina del uniformitarianismo, que sostiene que las fuerzas geofísicas que conformaron la Tierra y la vida han sido más o menos constantes a lo largo de la historia. Niles Eldredge, del Museo Americano de Historia Natural, y él acuñaron la noción de "equilibrio puntuado" en 1972 ("evolución a saltos", dicen los que les critican). Opinan que el registro fósil no respalda la concepción que tenía Darwin de la evolución como gradual, continua y monótona; los datos muestran, en cambio, largos períodos en los que reina la tranquilidad "puntuados" por estallidos relativamente cortos de especiación. En artículos posteriores han defendido que la especiación resulta no sólo de una selección natural que opere al nivel de los individuos, al estilo de la teoría darwiniana habitual, sino también de otros factores más complejos y contingentes.

La gran pesadilla de Gould es la falta de originalidad. El mismo Darwin reconocía que la evolución bien pudiera tener un ritmo variable, como les gusta recalcar a los críticos del equilibrio puntuado. Hay algo en el estilo literario de Gould que da pie además a que sus detractores —que son legión— especulen sobre segundas intenciones. ¿No nacerá su antipatía por el determinismo genético de un sesgo marxista? ¿No será un criptorrelativista, que piense que la ciencia no es más que una proyección del medio cultural? ¿Estará enredado en un complejo de Edipo con Darwin? Edward O. Wilson, uno de los colaboradores veteranos de Gould, que trabaja también en el magnífico Museo de Zoología Comparada de Harvard, ya me ha advertido que es difícil aclararse con él. "Steve usa la táctica del calamar", me explica Wilson. "Cuando le atacan, desaparece en una nube de tinta."

Gould es tan escurridizo en la vida real como en los artículos. Habla con un rápido murmullo, exponiendo incluso el razonamiento más complejo con una facilidad que deja entrever los vastos conocimientos que atesora. Decora su discurso, como sus escritos, con citas, que encaja con la entradilla "Es bien conocida la famosa cita de...". Con frecuencia parece distraerse, como si no atendiera a sus propias palabras. Tengo la impresión de que el simple hecho de hablar no basta para tenerle ocupado; en su cabeza debe de estar funcionando algún otro proceso, quizás en tareas de exploración, de anticipación de posibles objeciones a su discurso o de búsqueda de nuevos argumentos, analogías y citas.

Gould reconoce la influencia inicial que sobre él tuvo la famosa obra de Thomas S. Kuhn *La estructura de las revoluciones científicas.* Según Kuhn, la historia de la ciencia se compone fundamentalmente de períodos de investigación reposada y "normal", durante los cuales todo el mundo se ciñe a un único paradigma, pero que esporádicamente se ven interrumpidos por revoluciones; es entonces cuando algunos científicos, por lo general jóvenes y poco instruidos, fuerzan a sus colegas a rendirse ante un nuevo paradigma por razones que muchas veces no son muy racionales. Esta obra le hizo concebir la esperanza de que él, un joven de una familia de clase media-baja del barrio de Queens, cuyos padres no habían ido a la universidad,



UN HISTORIADOR, en el fondo: así se autodefine Gould (retratado en su despacho de Harvard)

pudiera hacer una contribución importante a la ciencia. El libro le ayudó también a rechazar "el modelo inductivista de hacer ciencia, de modo progresivo, pasito a paso, eso de ir juntando hechos poquito a poco y no hacer teorías hasta que seas viejo".

Cuando le pregunto si cree, como Kuhn, que la ciencia no progresa hacia la verdad, niega que Kuhn, profesor emérito del Instituto de Tecnología de Massachusetts, a quien conoce, sea de tal opinión. Aunque Kuhn sea el "padre intelectual" de los relativistas, Gould sostiene que acepta que "hay un mundo objetivo ahí fuera y que ahora lo conocemos mejor que hace unos siglos". La ciencia es demasiado aburrida, continúa Gould, para que un científico practicante sea un verdadero relativista cultural. "Hay que limpiar las jaulas de los ratones y calcular la concentración de las disoluciones y luego limpiar las placas de Petri". Nadie soportaría algo tan tedioso si no pensase que obtendrá a cambio una "mayor adecuación empírica".

Gould esquiva las sospechas de marxismo con la misma facilidad. Admite que algunas de las ideas de Marx son compatibles con las suyas propias. Marx consideraba que el cambio social tenía lugar "a la manera del equilibrio puntuado, mediante la acumulación de pequeños agravios en el sistema hasta que todo revienta".

Apenas puedo terminar de plantear mi siguiente pregunta, sobre si es o ha sido alguna vez marxista, antes de que me responda que no tengo más que recordar lo que dijo el propio Marx, que él no era marxista porque el término se había vuelto demasiado confuso. Ningún intelectual quiere identificarse demasiado con ningún "ismo", me explica, sobre todo con uno que abarque tanto. Además, Marx "se enredó con los temas de la predestinación y el determinismo, sobre todo en las teorías de la historia, que a mí me parece que debe ser completamente contingente. Pienso de verdad que estaba totalmente equivocado en eso".

Así que Gould no es ni relativista ni marxista. ¿Es darwinista? Para facilitar la entrada en materia le recuerdo que en el artículo original de 1972 él y Eldredge se referían al equilibrio puntuado como una "alternativa" al gradualismo de Darwin, mientras que en una recapitulación realizada en 1993 lo consideraban como un mero "complemento". ¿Representa este cambio de nomenclatura una concesión a la supremacía de Darwin? "¡Nunca escribí eso!", exclama Gould; "fue John Maddox, el editor de *Nature*, quien lo puso en el título sin consultarnos y me enfadé mucho con él por eso", rezonga.

Aunque a continuación indica que alternativa y complemento tampoco tienen un significado tan diferente: "Si dices de algo que es una alternativa, no significa que sea exclusiva. Me parece que el equilibrio puntuado predomina por completo en el registro fósil; esto implica que el gradualismo existe, pero que no tiene mucha importancia desde una perspectiva general".

"Darwin dio con la respuesta correcta sobre las interrelaciones básicas de los organismos", admite Gould, pero "eso es sólo el principio"; los biólogos que estudian la evolución tienen otros temas cruciales de los que preocuparse. ¿Como cuáles? "Ah, hay tantos que no sé por cuál empezar", responde. Queda por determinar "todo el conjunto de causas" subyacentes a la historia de la vida, desde las moléculas hasta las grandes poblaciones de organismos. Aparte están "todas esas contingencias", como los impactos de asteroides que se cree causantes de las extinciones generalizadas. "Así que yo diría que hay causas, intensidades de las causas, niveles de causas y contingencia". Reflexiona un momento. "No es un mal enunciado", dice, mientras saca del bolsillo de su camisa una pequeña libreta y lo apunta.

No parece que sea ni relativista ni marxista, como sugieren sus detractores. ¿Será darwinista?

Es más, el darwinismo podría quedar desbancado por alguna teoría más amplia, como le ocurrió a la mecánica de Newton con la mecánica cuántica. "Puede que resulte que la evolución de la vida en este planeta sea una parte muy pequeña del fenómeno de la vida", dice. ¿Es que Gould cree que hay vida en alguna otra parte del universo? "¿Y usted no?", replica. Le digo que me parece una pura cuestión de opiniones. Para mi regocijo, Gould hace una mueca de contrariedad; por una vez, le he pillado.

Sí, desde luego, el que haya vida en otros sitios es discutible, contesta, pero de todas maneras se puede especular con cierta base. La vida parece haber surgido bastante rápidamente aquí en la Tierra, puesto que las rocas más antiguas que podrían tener rastros de vida de hecho los tienen. "La inmensidad del universo y la improbabilidad de que cualquiera de sus partes sea única nos llevan a la enorme probabilidad de que haya algún tipo de vida por ahí".

Como un hijo rebelde, que se revuelve contra su propio padre pero salta cuando otros le atacan, hay momentos en que Gould defiende con todas sus fuerzas a Darwin. Recuerda muy satisfecho la forma en que, cuando los creacionistas empezaron a utilizar el equilibrio puntuado como muestra de la no aceptación general de la teoría de la evolución en 1970, él los desenmascaró exponiendo sus "mentiras". También respondió con dureza a algunos embites científicos al darwinismo tradicional, como la hipótesis de Gaia, según la cual todas las especies cooperan de algún modo para asegurar su mutua supervivencia. "Gaia no es más que una metáfora", dice. "No veo nada causal en Gaia".

Recela también de la vida artificial, un territorio científico bisoño. Aunque le interesan mucho las posibilidades que ofrecen los ordenadores para explorar distintos escenarios evolutivos, le preocupa la propensión excesiva a formular la evolución en términos matemáticos.

En su opinión, muchos científicos hacen una distinción entre la ciencia, que suponen dedicada a desentrañar leyes universales, y la historia, que trata de los hechos particulares y contingentes. "Me parece una taxonomía errónea. La historia es un tipo de ciencia diferente". A él le encanta lo difuminada que es la historia, su resistencia a un análisis directo. "¡Me gusta! En el fondo soy un historiador."

Puede que ésta sea la clave para entender a Gould. Si la historia de la vida es un pozo sin fondo, se podrá seguir excavando para siempre sin temor a que el esfuerzo resulte trivial o redundante. Al menos eso es lo que él espera. Lleva más de diez años trabajando en un voluminoso tratado, cuyas más de mil páginas espera publicar al año que viene bajo el título de *The Structure of Evolutionary Theory*. Tras soltar tan vasta nube de tinta, ¿cambiará acaso de inquietudes intelectuales? "Ah, la teoría de la evolución es tan vasta...", dice sonriendo beatíficamente, "que hay para toda una vida."

Ciencia y sociedad

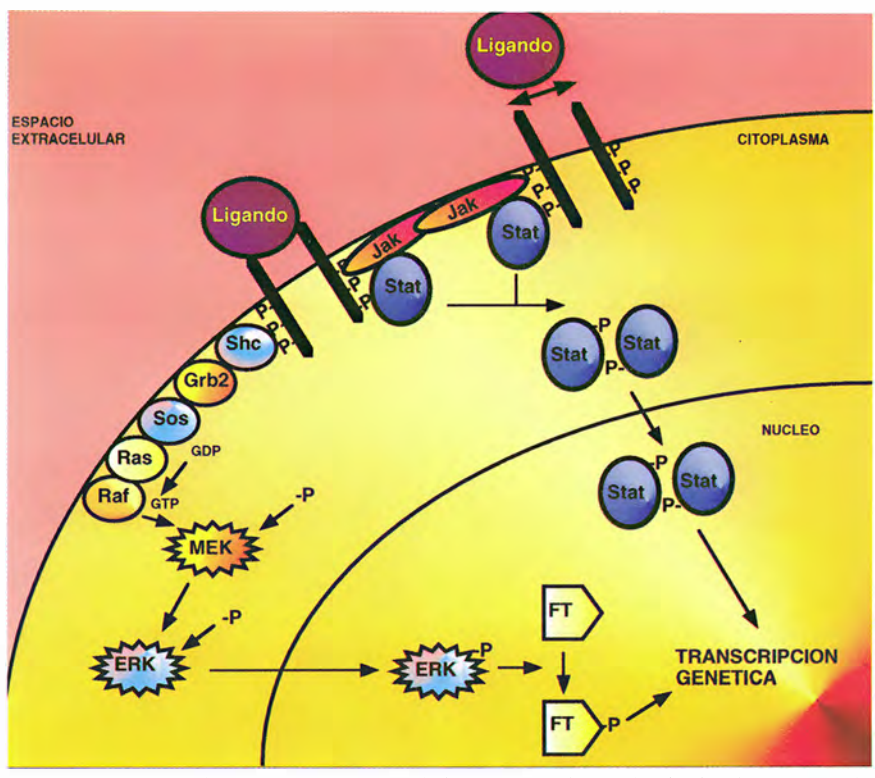
Tirosina

Multifacética fosforilación

Este año se cumple el decimoquinto aniversario del descubrimiento de la fosforilación de la tirosina como fenómeno indicativo de activación celular. Este hallazgo ha supuesto un avance extraordinario en el conocimiento de los procesos que requieren la transducción de señales desde el exterior hasta el interior de la célula, así como la transmisión de señales por el interior celular.

La tirosina es uno de los aminoácidos utilizados en la formación de las proteínas. Como la serina o la treonina, otros aminoácidos, la tirosina puede fosforilarse también, es decir, puede aceptar una molécula de fósforo en virtud de la intervención de una quinasa, una enzima. Durante el proceso de fosforilación, la molécula que contiene la tirosina se activa, lo que suele comportar un cambio conformacional de aquélla. Muchas de estas moléculas son enzimas y, en ellas, el cambio conformacional facilita la adquisición de trifosfato de adenosina (ATP), si son quinasas, u otro substrato, con lo que se puede manifestar su actividad enzimática. En otras moléculas sin actividad enzimática, la "activación" como tal se traduce en un cambio estructural requerido para su conversión en forma funcional.

Hay, en la membrana celular, diversas formas de quinasas de tirosina, capaces de catalizar el intercambio de fósforo desde una molécula de ATP a la tirosina. Algunas de estas enzimas son de suyo receptores de membrana; pensemos, por ejemplo, en el receptor para el factor de crecimiento epidérmico o el receptor del factor de crecimiento derivado de plaquetas. Otras enzimas no son receptores por sí mismas, pero pueden interaccionar con receptores de membrana después de que éstos se unan a su ligando (así, la quinasa lck, asociada al correceptor CD4, y que se combina con el complejo receptor de los linfocitos *T*). Finalmente, un tercer grupo incluye quinasas que están permanentemente unidas a un receptor particular (entre ellas, las quinasas Jak).



Dos tipos generales de respuesta celular que utilizan la fosforilación de la tirosina. La unión de receptores de membrana con su ligando induce la dimerización-oligomerización de estos receptores con la consiguiente fosforilación de residuos tirosínicos en los segmentos intracelulares de estos receptores. La fosforilación de estas tirosinas induce la asociación y activación de substratos celulares, de manera secuencial, que conducen a la inducción de una nueva expresión de los genes. Esto obedece a la acción directa de substratos fosforilados que son, a su vez, factores de transcripción (los Stat), o a los substratos fosforilados que son quinasas y que, tras su translocación hasta el núcleo, fosforilan a factores de transcripción (vía de las MAPK)

Los receptores de membrana se activan al unirse con su ligando. No se conoce bien la base estructural de la activación de las tirosín-quinasas y la consecuente fosforilación de la tirosina. En algunos casos, parece evidente que la fosforilación inicial requiere la dimerización previa o agregación de varios receptores, probablemente mediada por los ligandos; esa fosforilación inicial mutua (transfosforilación) se amplifica progresivamente. Tal fosforilación de aminoácidos tirosina constituye, pues, una señal de inicio de una cascada de reacciones químicas, que incluyen la asociación de enzimas con otras enzimas, con proteínas que actúan de adaptadores de esta asociación, con proteínas de múltiples funciones celulares, o con otros substratos. En esa secuencia de reacciones químicas se dan, a menudo, procesos de fosforilación de tirosinas, serinas o treoninas. Se trata de una cascada de eventos: a cada paso de la misma se produce un amplificación de la señal original que desencadena la activación o modificación de distintas proteínas.

Estos procesos poseen un carácter modular. Quiero decir que, en las reacciones químicas implicadas, participan moléculas que contienen dominios o módulos (secuencias de 50 a 100 aminoácidos) comunes a distintas proteínas en especies diferentes. Se han descrito dos tipos generales de módulos: los que intervienen en la unión de proteínas con fosfotirosinas y los requeridos para la

unión de ciertas proteínas con otras proteínas.

Entre los primeros, el módulo habitual es el SH_2 (llamado así por su homología con una secuencia de aminoácidos del oncogén *src*). Se ha descubierto recientemente otro de función similar, el módulo PTB. El segundo tipo general comprende los módulos SH_3, que se unen a regiones moleculares ricas en prolina, y los módulos de plekstrin de unión con fosfolípidos y proteínas membrana. Aunque dista mucho de conocerse la función de estos módulos, parecen imprescindibles en el reclutamiento de substratos de las distintas vías de transducción de señales.

En las vías metabólicas de fosforilación operan moléculas adaptadoras; constan de varios dominios SH_2 y SH_3 que facilitan la interacción entre dos moléculas (una enzima y su substrato). La existencia de los adaptadores otorga a este mecanismo biológico una mayor versatilidad, a la vez que facilita la existencia de vías metabólicas específicas para cada órgano o tejido. Además, la modularidad posibilita la translocación de substratos hacia distintos compartimentos celulares requeridos para la activación celular; ahí quizá resida la base de la especificidad funcional de cada vía transductora.

Se recurre al mecanismo de fosforilación de la tirosina en múltiples procesos celulares que requieren transmisión de señales. Son los que encontramos en el desarrollo embrionario y crecimiento y diferenciación celular, en las respuestas de activación celular, en la determinación de la forma celular, en procesos de comunicación intercelular y de adhesión celular, en el metabolismo de la glucosa, en angiogénesis y en la apoptosis (muerte celular). Pese a tratarse de procesos muy dispares, la base molecular viene a ser la misma. Son, además, procesos de una importancia biológica capital; para corroborarlo, basta observar que se dan en toda la escala evolutiva, desde levaduras hasta humanos, o considerar el alto número de quinasas que se prevé en distintos organismos: en el genoma humano, una estimación inicial habla de la existencia de unas 2000 quinasas distintas.

La mayoría de los procesos que utilizan la fosforilación de la tirosina como base bioquímica terminan con la regulación de la expresión genética. Ante la fosforilación de residuos tirosínicos y la activación de distintas quinasas se han descrito dos tipos generales de respuesta (*véase figura*). La primera consiste en la translocación directa de los substratos, del citoplasma al núcleo; aquí estos substratos actuarán como quinasas de factores de transcripción para el inicio de la expresión de nuevos genes. Dicha vía está representada por la cascada de fosforilación de quinasas activadas por mitógenos (MAPK); en el proceso, la activación del receptor inicia el reclutamiento y activación de un substrato (por ejemplo, Sos) a través de un adaptador (la proteína Grb2). La activación de Sos en la membrana celular activa, a su vez, a Ras (que es una GTPasa). En su forma activa con GTP, Ras se une a Raf resultando en la fosforilación de tal factor en la membrana. Cuando Raf está activado, se produce una cascada de activación de distintas quinasas, MEK1 y 2 y ERK 1 y 2, y la translocación de esta última al núcleo, donde fosforila distintos factores de transcripción que iniciarán la expresión genética requerida.

El segundo tipo de respuesta celular se basa en la activación directa de un factor de transcripción genuino y su posterior translocación al núcleo. Recurren a este tipo de respuesta distintos receptores para citocinas e interferones, que portan constitutivamente asociados quinasas Jak. Las quinasas Jak se activan cuando los receptores se acoplan a sus ligandos, activación que se traduce en la fosforilación de tirosinas en la molécula del receptor y en Jak. Las fosfotirosinas reclutan moléculas que contienen SH_2, y en particular, moléculas Stat ('signal transducers and activators of trancription'). Cada Stat tiene sus propias tirosinas; éstas, una vez fosforiladas, inducen su dimerización y posterior translocación al núcleo, donde actuará como factor de transcripción. Puesto que citocinas e interferones utilizan diversas combinaciones de Stat, se consiguen la especificidad y variabilidad necesarias.

A lo largo de los últimos 15 años hemos avanzado bastante en el conocimiento descriptivo y estructural de las bases moleculares de la fosforilación de la tirosina, así como de la importancia de este fenómeno en múltiples procesos biológicos. Queda, sin embargo, mucho camino por recorrer. Sería deseable entender la base molecular del proceso inicial de activación del receptor y el mecanismo en virtud del cual se consigue especificidad de los substratos comunes en distintas vías metabólicas. Para pensar en aplicaciones terapéuticas, habría que dominar los procesos de oligomerización y activación de receptores.

En cuanto a la especificidad de la reacción enzimática, parece obvio que no se trata sólo de un proceso de reconocimiento del residuo fosforilado, sino de desentrañar también el contexto de la secuencia de estas fosfotirosinas y de los factores que determinan la localización exacta de las quinasas en el interior celular.

Por último, donde hay fosforilación debe haber defosforilación o reversión al estado inicial. La regulación de los procesos de fosforilación de la tirosina a través de fosfatasas es, en la actualidad, el nuevo reto, para cuya superación habrá que esperar el refinamiento de las técnicas disponibles.

El estudio de las cascadas de fosforilación de la tirosina constituye, pues, un campo extremadamente atractivo por su interés biológico fundamental y su potencial terapéutico. Aunque cada vez es más difícil resumir el conocimiento en este campo, es muy reconfortante saber que cada vez es más fácil explicar su biología molecular.

JOAQUÍN MADRENAS
Instituto Nacional de Alergia
y Enfermedades Infecciosas (NIH)
Bethesda, EE.UU.

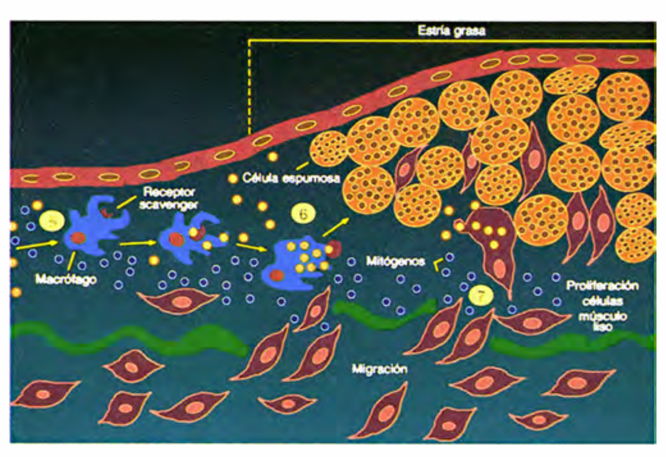
Pediatría

Aterosclerosis infantil

Por paradójico que parezca, las lesiones de aterosclerosis no son un fenómeno de la edad adulta. Se producen en etapas precoces de la vida. Inicialmente se presentan en forma de estrías grasas en la aorta de lactantes incluso. Lesiones similares se observan en las arterias coronarias, junto con otras de carácter fibrótico y que hacen protrusión en la luz vascular, durante la segunda década de la vida. El proceso continúa desarrollándose durante los años siguientes y determina la clínica que finalmente se manifiesta en la vida adulta. Los mecanismos patogénicos que se supone están presentes en el desarrollo de la aterosclerosis en edades infanto-juveniles se exponen a continuación.

La aterosclerosis es el resultado de complejas interacciones entre estímulos perjudiciales y reparación o respuestas reparadoras de la pared arterial que tienen lugar en forma de cascada en presencia de diversos ambientes bioquímicos y factores genéticos. La demostrada susceptibilidad de ciertas zonas arteriales refleja la





Imágenes secuenciales del estadio Ia, o inicial, del desarrollo de aterosclerosis en edades infantiles

importancia del ambiente hemodinámico en la iniciación focal y subsecuente desarrollo de las lesiones de aterosclerosis.

Múltiples son los elementos que intervienen en la patogenia de la aterosclerosis: células endoteliales, células de la musculatura lisa de los vasos arteriales, monocitos, plaquetas, lipoproteínas de baja densidad, lipoproteínas-a, citoquinas y moléculas de la adhesión celular. Destacan, sin embargo, las células endoteliales y las de músculo liso de los vasos arteriales. El endotelio contribuye a la generación de moléculas de adhesión celular, así como a la disponibilidad para regular el paso de macromoléculas. El principal aporte de las células de músculo liso a la aterogénesis es la síntesis de colágeno, base del tejido fibroso o "escleros", elemento esencial en el desarrollo y maduración de la placa de aterosclerosis.

En hipercolesterolemias y en la fase inicial de la aterosclerosis se registra un aumento focal de monocitos en el endotelio vascular, en áreas predispuestas a lesiones de la íntima. Los monocitos se adhieren al endotelio, lo atraviesan y pasan a la íntima; experimentan luego una activación-diferenciación que los transforma en macrófagos. Estos generan radicales libres y enzimas (proteasas y lipasas). El resultado final es la formación de los progenitores de las células espumosas, ricas en ésteres de colesterol, elementos patognomónicos de las lesiones precoces ateroscleróticas.

La llegada de monocitos a la íntima arterial se asienta sobre un proceso inflamatorio, en el que están implicados diversos mecanismos. La adhesión monocitaria es otro de los procesos básicos, ya que afecta a la expresión de las moléculas de adhesión leucocitaria, al endotelio y a la secreción de determinadas citoquinas, tales como la interleucina 1-beta y el factor estimulador de colonias de monocitos. Tras unirse al endotelio, el monocito inicia su migración. No se conocen bien los mecanismos que constituyen su paso transendotelial, de la sangre al espacio subendotelial; pero, una vez que se inicia, se supone que las células disponen de algún sistema que las dirige. Quizá se trate de sustancias quimioatrayentes, como el factor quimiotáctico derivado de células de músculo liso, conocido como proteína quimiotáctica de monocitos-1, y que es producido por células de músculo liso y endoteliales. Aunque muchos otros quimioatrayentes (por ejemplo, lipoproteínas de baja densidad) intervienen también en la migración monocitaria, se le atribuye el papel principal a MCP-1. Una vez que los monocitos han alcanzado el espacio subendotelial, experimentan un complejo proceso de activación-diferenciación que los transforma, según hemos dicho, en macrófagos. La intervención de factores de inhibición migratoria favorece su permanencia en la íntima de la pared vascular.

Varios son los tipos de modificaciones que pueden tener alguna influencia sobre la estructura y funciones de lipoproteínas de baja densidad (LDL): acetilación, modificación oxidativa, glucosación enzimática y glucoxidación, fenómeno recientemente detectado. Las modificaciones alteran la capacidad de reconocimiento de LDL, hasta el punto de que la lipoproteína de baja densidad modificada no la reconocen los receptores habituales de LDL y sí los receptores carroñeros de los macrófagos. Estos últimos receptores, que no se regulan con la acumulación de colesterol, constituyen otra vía para la constante captación, por parte del macrófago, de las lipoproteínas químicamente modificadas que dan origen a las células espumosas.

Las lipoproteínas-a y partículas densas de LDL pueden oxidarse o modificarse. La oxidación de LDL por radicales libres, generados por células de músculo liso, macrófagos y probablemente células endoteliales, tiene importantes consecuencias biológicas. La modificación oxidativa de LDL aumenta la expresión y síntesis de MCP-1 y de interleucina-1 e inhibe la migración de monocitos. Además, favorece los mecanismos inflamatorios de carácter autoinmunitario. Son, todos ellos, procesos que desempeñan alguna función en el desarrollo de la aterosclerosis.

La presencia en las arterias ateromatosas de linfocitos *T* junto a monocitos-macrófagos indica que no sólo existe una reacción inflamatoria durante el proceso de aterogénesis, sino que están presentes, también, reacciones inmunitarias. Aunque se desconocen los antígenos implicados, se han identificado autoanticuerpos contra la modificación oxidativa.

Disponemos de varias estrategias preventivas y terapéuticas encaminadas a evitar la evolución de la aterosclerosis.

En primer lugar, pueden modificarse los niveles de lipoproteínas de baja densidad con la reducción de la ingesta de ácidos grasos en la dieta. En segundo lugar, se sabe ya que la vitamina E, los beta-carotenos y el probucol —agentes con propiedades antioxidantes— ejercen efectos antiaterogénicos. En tercer lugar, es conocido que el proceso aterosclerótico se modifica ante la presencia de agentes inhibitorios de monocitos y de macrófagos. Y en cuarto lugar, la optimización de la respuesta inflamatoria–inmunitaria puede ser esencial

en el desarrollo de nuevas técnicas de prevención y tratamiento del mecanismo aterogénico.

Resulta, pues, imprescindible atender a los nutrientes que entran en la dieta del niño, si se quiere evitar el desarrollo de la aterosclerosis desde edades tempranas de la vida.

ANTONIO SARRÍA CHUECA
Area de Pediatría,
Facultad de Medicina
Universidad de Zaragoza

Relatividad

¿Qué hacer con los agujeros negros?

Los agujeros negros alimentan las paradojas. Aunque en nuestros días se están "descubriendo" agujeros negros con monótona regularidad, muchos físicos prominentes consideran que su existencia dista de haberse comprobado. "No creo en los agujeros negros", afirma tajante Philip Morrison, físico del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

A los escépticos les habrán levantado los ánimos dos recientes intentos teóricos de acabar con ellos, o al menos con sus aspectos más excéntricos. Las dos propuestas aceptan que el espacio aloja objetos de una masa y una densidad excepcionales. Los astrónomos han hallado muchas pruebas de la existencia de esos monstruos llenos de poder gravitatorio; pero las nuevas teorías modifican la relatividad general —la teoría de la gravedad de Einstein— para conferir algún gramo de sensatez a tales objetos.

Según el modo habitual de entender la relatividad, los agujeros negros no son sólo densos, sino infinitamente densos; en su centro, al que se llama singularidad, el espacio, el tiempo y la misma causalidad se alteran hasta resultar irreconocibles. Tan indecentes son los agujeros negros, que unos "horizontes de sucesos" tienen que ocultarlos, a modo de membrana, ante el resto del universo, lo que también pone a prueba la credulidad. El tiempo corre tan despacio en un horizonte de sucesos con respecto al resto del universo, que desde fuera parece que todo lo que cae en uno se queda allí por toda la eternidad. Los observadores externos no verán nunca, pues, caer nada dentro de los agujeros negros, a los que se supone tan voraces.

Una propuesta avanzada por Hüseyin Yilmaz, físico afiliado a la Universidad Tufts y a Hamamatsu Photonics, eliminaría estas paradojas. Desde los años cincuenta, Yilmaz intenta construir una teoría que preserve el armazón de la relatividad general y elimine sus efectos más anómalos. Sólo hace poco ha conseguido Yilmaz la que considera es una versión sólida de su idea.

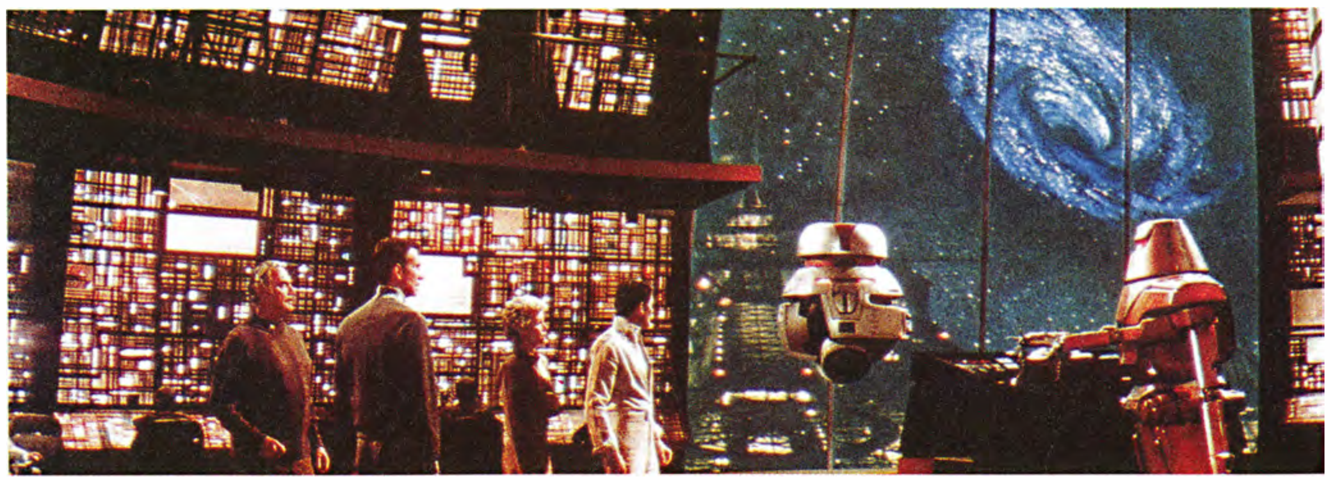
Yilmaz modifica la relatividad general haciendo que el campo gravitacional, en cuanto forma de energía, tire también de sí mismo. Como sentencia un colega suyo, "la gravedad gravita". La adición de este factor, por varias razones técnicas, evita que las masas grandes sufran el derrumbe catastrófico que genera las singularidades y los horizontes de sucesos.

Yilmaz tiene una defensora y colaboradora entusiasta en Carroll O. Alley, de la Universidad de Maryland. La propuesta es una "alternativa bien definida" a la relatividad general que "tiene mucho sentido", dice Alley. Los artículos de Yilmaz y Alley se han publicado en los *Annals of the New York Academy of Sciences* de 1995. Alley señala que al propio Einstein le espantaban algunas de las extrañas predicciones que hacía su explicación de la gravedad. "Para nosotros, esto completa la obra de Eisntein."

Pero John W. Moffat, de la Universidad de Toronto, no está muy de acuerdo. Según sus análisis, la teoría de Yilmaz podría eliminar los horizontes de sucesos, pero no las singularidades. Ello dejaría a las singularidades "desnudas", añade Moffat con horror. "Es un desastre." Claro, puede que Moffat esté sesgado: él prefiere su propia versión modificada de la relatividad general. Junto con su doctorando Neil J. Cornish, Moffat ha presentado su trabajo en el número de julio del *Journal of Mathematical Physics*. En su enfoque de la relatividad, el espacio-tiempo se puede no sólo doblar, sino retorcer en respuesta a la presencia de grandes masas; la añadidura de este parámetro de "torsión" extra expulsa los horizontes de sucesos y las singularidades.

Moffat sostiene que su hipótesis limpia también uno de los problemas más perturbadores de la física teórica moderna. Varios teóricos, sobre todo Stephen Hawking, han argüido que los agujeros negros einsteinianos destruyen información y con ello violan las nociones básicas de causa y efecto. Pero si no hay agujeros negros einsteinianos, sostiene Moffat, no hay pérdida de información.

Tanto Yilmaz como Moffat intentan hallar la forma —a falta de una visita a un agujero negro— de contrastar sus hipótesis. Tiene su ironía que los trabajos de Yilmaz inspirasen



Los agujeros negros abundan en la ciencia ficción, como en esta película de 1979, El agujero negro, *pero hay físicos que todavía dudan de su existencia*

un experimento que podría determinar la falsedad de lo que propone. A finales de los años cincuenta, George Pugh, tras asistir a la presentación que Yilmaz hizo de una versión anterior de su modelo, propuso un experimento complejo —con un giróscopo en un entorno ingrávido— que contrastase rigurosamente la relatividad general. El plan de Pugh, combinado con otros, se convirtió en la Misión Relativista de la Sonda B de la Gravedad. Está previsto que un cohete lance el experimento al espacio en 1999.

La mayoría de los teóricos piensa que es mucho más probable que sobreviva la relatividad del propio Einstein a esa prueba que las otras versiones. La que plantea Yilmaz es "una porquería", "basura", "ni siquiera es una teoría genuina", se burla Clifford M. Will, de la Universidad de Washington. La de Moffat merece más respeto, pero también sufre problemas técnicos, dice Will. Y se apresta a confesar que no cree que haya en realidad necesidad de semejantes teorías, pues no le parece que las singularidades y los horizontes de sucesos sean tan extraños: "Esas otras teorías son mucho más exóticas."

Morrison, ni que decir tiene, discrepa. Puede que las propuestas de Yilmaz y Moffat acaben en nada, dice, pero son, en todo caso, "ejemplos de lo que hace falta" para que la astrofísica vuelva a los cauces de la sensatez.

JOHN HORGAN

Del Aral al Caspio

Niveles fluctuantes

A lo largo de los últimos treinta años las aguas de los ríos que alimentan el mar de Aral, en lo que fue Asia Central Soviética, se han derivado, de forma creciente, para usos agrícolas. Por culpa de ello, el nivel de ese mar ha caído en picado. Dan fe de esa bajada tan brusca —quince metros en sólo veinte años— las barcas de pesca, antaño varadas en su orilla y hoy pudriéndose en las dunas recién formadas.

El cuadro se ha convertido en bandera ecologista. Al Gore, vicepresidente de los Estados Unidos, se sirvió de una imagen impresionante —deambular de camellos entre barcas abandonadas "del desierto"— para promocionar su libro, *Earth in the Balance*, un alegato contra la manipulación de la naturaleza. La Oficina norteamericana para el Desarrollo Internacional ha establecido programas de ayuda a las comunidades de los aledaños del mar menguante, y el Banco Mundial piensa financiar un proyecto de recuperación.

Pero no podemos quedarnos en la piel del asunto. Aunque el mar de Aral se está vaciando, otro muy cercano y mucho mayor, el mar Caspio, sube su nivel.

Pareció durante mucho tiempo que el Aral y el Caspio cumplían un elemental principio de hidrología: las modificaciones río arriba conducen a una disminución de las aguas río abajo. Durante décadas la altura del mar Caspio se movió al compás de las obras públicas (represas) que se acometían en sus tributarios, el Volga entre ellos. En los años treinta se construyeron numerosas presas hidroeléctricas, y el nivel del Caspio bajó; al suspenderse los proyectos en la Segunda Guerra Mundial, se estabilizó el nivel del mar. Acabada ésta, volvieron a construirse embalses y tornó a descender el nivel de las aguas.

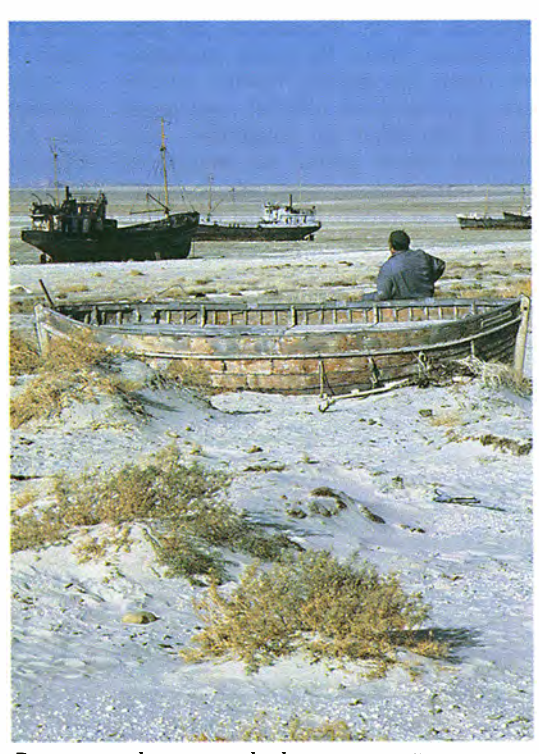
Sin embargo, en 1977 ocurrió un cambio extraño. La intervención del hombre en la cuenca fluvial continuó incrementándose, pero el Caspio, en vez de agotarse, empezó inexplicablemente a subir. Los hidrólogos soviéticos atribuyeron el cambio a alguna anomalía transitoria y terminaron una presa para aislar la bahía somera de Kara-Bogaz, en la costa este. Evitando la pérdida por evaporación de las aguas de la bahía, creíase, se frenaría la caída general del nivel del mar.

El Caspio no les hizo caso y continuó aumentando. Muchos núcleos rurales y áreas industriales iban quedando por debajo del nivel de las aguas; ante lo cual, el gobierno de Turkmenistán decidió en 1992, después de que el mar subiera dos metros, abrir la presa de Kara-Bogaz. "Estaban convencidos de que se podía cambiar la naturaleza", afirma Sergei N. Rodionov, presidente del Instituto Oceanográfico de Moscú. Un enfoque completamente distinto del actual. Si bien, aunque resignados a dejar que la naturaleza siga su curso, los científicos quisieran saber qué es lo que está pasando y por qué.

La mayoría de los expertos atribuyen ese aumento a los cambios operados en el clima de la cuenca de drenaje del Caspio: la mayor precipitación aumenta el caudal de los ríos. Algunos sostienen, sin embargo, que el fondo marino podría estar resintiéndose de las recientes alteraciones tectónicas operadas en esa región, geológicamente activa. Otros, también rusos como los anteriores, han sugerido que el agua del Aral —situada unos 70 metros más alto— podría fluir, subterráneamente, hacia el Caspio, lo que explicaría las respectivas oscilaciones de nivel.

Philip P. Micklin, de la Universidad Oriental de Michigan, especialista en el mar de Aral, descarta esta idea como "totalmente disparatada". En su opinión, no hay pérdida suficiente de agua del Aral para justificar la subida del Caspio; además, el aumento de la aportación del Volga nos revela de dónde proviene el exceso de agua: "¿Por qué buscar razones complicadas cuando está claro qué está pasando?"

Micklin reconoce, sin embargo, que se producen fases alternantes en estos dos mares interiores. Se sabe, apostilla, que el río Amu Darya, tributario habitual del Aral desde el sur, ha fluido por un banco izquierdo para morir en el lago Sarykamysh en el oeste. Este lago, a su vez, desagua en el Caspio. Se trata de cambios de dirección que se han repetido, a



Barcos en la arena de lo que antaño era mar de Aral. Mientras tanto, el nivel de su vecino Caspio no deja de subir

buen seguro, en el pasado; provocados incluso por ejércitos invasores. Puesto que el flujo del Amu Darya hacia el Aral ha dependido de los diques y presas construidos en la parte superior de la cuenca, su destrucción ha provocado subidas del Sarykamysh y bajadas del Aral.

Intervenciones estratégicas del entorno, en el pasado, podrían explicar el hallazgo de Dimitri O. Eliseyev, del Instituto Pedagógico de Leningrado, quien encontró troncos envejecidos en la parte norte del Aral en 1990. Los restos de árboles demuestran que el mar tenía antes un nivel aún más bajo. Se trataría, aducen los investigadores, de especies que medraron a lo largo de varias décadas hace unos 400 años. Este período corresponde a los años que el Amu Darya fluyó por última vez hacia el oeste, hacia el Caspio, antes de desviarse hacia el norte en 1575 para alimentar el Aral.

Así pues, la convicción de que el hombre puede doblegar a voluntad la naturaleza surgió mucho antes de que los Soviéticos llegaran a Asia Central. Sin embargo, los planificadores soviéticos demostraron un entusiasmo sin paralelo en esa línea. Proyectaron incluso alimentar los mares Caspio y Aral desviando los cauces de los ríos que desembocan en el océano Artico.

DAVID SCHNEIDER

Dieta

Fibra de frutas

No es moda caprichosa del hombre contemporáneo la atención a la ingesta de alimentos fibrosos, o preparados ricos en fibra. La propia observación del comportamiento fisiológico intestinal del hombre y de los animales habla de esta necesidad. Pero han sido los estudios que relacionan la fibra dietética con el colesterol o el cáncer de colon los que han hecho de aquélla un tema de actualidad.

Dentro de la fracción no digestible de los alimentos, la fibra dietética reviste cierta importancia. Sin embargo, el concepto de fibra no tiene una definición plenamente aceptada. Atendiendo a su composición química, llamaremos fibra dietética a la totalidad de polisacáridos no amiláceos y de lignina, presentes en los alimentos, que no son digeridos por las secreciones propias del tracto intestinal. Del conjunto de alimentos que forman parte de nuestra dieta, los más fibrosos son las legumbres (con un 10 % de su peso de fibra), los cereales (con el 2 %), y las frutas y verduras (3 %).

Se dice que una dieta está equilibrada cuando, satisfechas todas las necesidades de los distintos nutrientes, la fibra ingerida se aproxima a los 30 gramos por día. Cantidad ésta difícil de alcanzar incluso en la dieta mediterránea. Españoles e italianos somos quienes consumimos mayor cantidad de fibra (20-22 g) entre los europeos, correspondiendo a los ingleses el menor nivel de ingestión (12-14 g).

La industrialización de los países occidentales ha comportado cambios notables en los hábitos alimentarios, con resultados no siempre negativos. Así, la mayor altura de los españoles ha de atribuirse, básicamente, a una alimentación más correcta. Pero no todo es beneficioso. La dieta moderna, pobre en fibra, no contribuye a prevenir las enfermedades de la civilización, en particular ciertos tipos de cáncer y complicaciones cardiovasculares. Deficiencia que se trata de compensar con el consumo de concentrados fibrosos.

En las denominadas fibras de alta calidad, como son las obtenidas a partir de frutas, trabaja el equipo de Fulgencio Saura Calixto, del Departamento de Metabolismo y Nutrición del Instituto del Frío (CSIC).

Digamos antes de seguir que la fibra dietética está constituida por dos fracciones distintas: una soluble en agua (o dispersable) y otra insoluble. La primera tiene como propiedades más importantes una gran capacidad de absorción de agua, la de aumentar la viscosidad de la digesta y la de incrementar la fermentabilidad en el intestino grueso. Carece, sin embargo, de acción mecánica. En la fibra insoluble, por el contrario, la característica más notable es esta acción de tipo mecánico. Ambas fracciones tienen, pues, propiedades y aplicaciones bien diferenciadas.

El análisis químico del contenido en fibra y de sus fracciones en algunos productos representativos, cuyo resultado recoge la tabla adjunta, es bien demostrativo de las diferencias entre unos y otros.

En la obtención de los "nuevos" preparados de fibra una de las operaciones más importantes es la correspondiente al lavado, mediante el cual han de eliminarse la mayor parte de los azúcares, inactivarse las enzimas y disminuir la carga microbiana. Importante, asimismo, es la elección de temperatura y tiempo en la operación de secado, que ha de respetar las propiedades físicas y las características organolépticas del producto.

Los preparados de elevado contenido en fibra insoluble y pobres en fibra soluble —salvado de trigo— actúan, principalmente, incrementando el volumen fecal y son recomendables para evitar el estreñimiento. Su acción sobre el colesterol, excepto el salvado de avena, es escasa, si bien podrían desempeñar cierto papel en la prevención del cáncer de colon.

Los "nuevos" concentrados en fibra soluble, más equilibrados en las dos fracciones de fibra, tienen un espectro de acción más amplio y junto al efecto laxante de la fibra insoluble se suman los específicos de la fracción soluble, como son los relativos al colesterol en sangre, la protección frente al cáncer de colon y la disminución de la glucosa en sangre después de las comidas, cuya importancia para los diabéticos es indudable.

FRANCISCO TORTUERO
Jefe del Departamento de
Metabolismo y Nutrición
Instituto del Frío
Madrid

	FIBRA TOTAL*	FIBRA INSOLUBLE*	FIBRA SOLUBLE*
SALVADO DE AVENA	15,5	8,0	7,5
SALVADO DE TRIGO	44,5	41,5	3,0
FIBRA DE FRUTAS	60	47,55	12,5
NUEVA FIBRA DE FRUTAS	60-70	40-50	20-30

* (g/100 g de producto)

De cerca

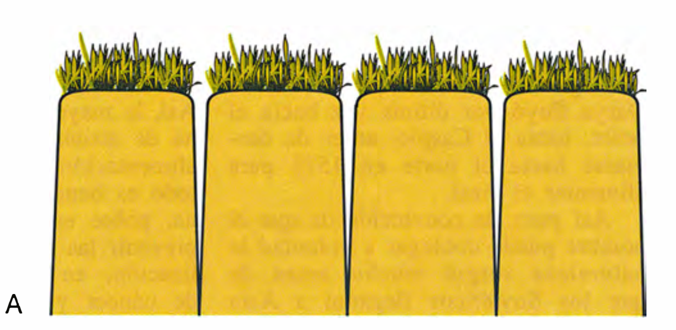
Fotos y texto: Fernand Verger

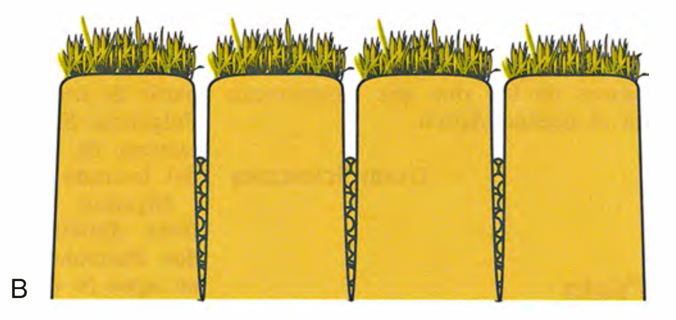
Los toscales, explicados

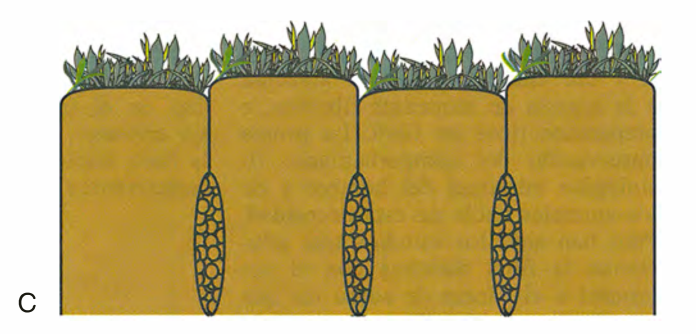
Se trata de toperas? ¿De las señales del paso de un rebaño? Si bien el aspecto de los mogotes o glebas que se ven en la página de la derecha resulta familiar, el proceso que los causa es menos conocido: estas gibas resultan de fuerzas engendradas por la alternancia de la desecación y la humidificación de los suelos arcillosos. Para distinguirlas de los microrrelieves similares causados por el ciclo del hielo y del deshielo (los *thufurs*, habituales en Islandia), los edafólogos y los geógrafos las designan con el término vernáculo australiano de *gilgai*. Pero existen *gilgais* en otras muchas latitudes y se les conoce por otros muchos nombres: revolcaderos de búfalos en los Estados Unidos, salgüeros o toscales en España, *mottureaux* en Francia, etc.

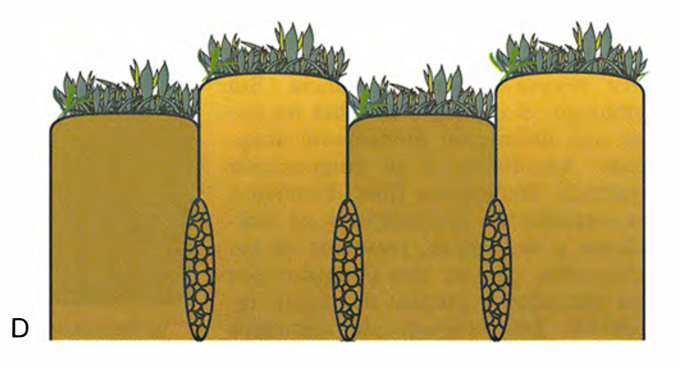
¿Cómo se forman los *gilgais*? Durante los períodos de sequía, los suelos arcillosos se retraen bajo el efecto de la desecación y se abren en ellos numerosas hendiduras. Estas fisuras forman una red aproximadamente hexagonal y delimitan unas columnas prismáticas en el espesor del suelo *(A)*. El viento, los animales y los aguaceros breves provocan que diversas partículas las vayan rellenando *(B)*. Cuando retornan las lluvias, o durante las inundaciones, el suelo se empapa de agua y se dilata; al tiempo que las hendiduras se cierran, el material intersticial ejerce una presión lateral que provoca el levantamiento de algunas columnas *(C)*. Las columnas elevadas se desecan más rápidamente que las demás: se tornan menos plásticas y experimentan así una presión ascensional más fuerte *(D)*. Amplificado de este modo, el movimiento de levantamiento alcanza una velocidad de varios centímetros por año.

Algunos autores no han visto en los *gilgais* más que microrrelieves de origen animal. Esta equivocación se debe al hecho de que la parte alta de los toscales, que sirve de refugio a los insectos y a los roedores cuando hay inundaciones, resulta colonizada de preferencia. A veces es difícil separar las causas de las consecuencias.









1. Estos *gilgais* tachonan un prado del pantano Poitevin. Seguramente están alineados en la dirección de antiguas labores.

2. Este pantano, abollonado por *gilgais* en su parte inundable, está situado a orillas del mar Negro, en los alrededores de Ordu, Turquía.

La genética de los chuetas mallorquines

El aislamiento de los chuetas con respecto a la población mallorquina ha mantenido algunas características genéticas judías originarias. La elevada incidencia de la fiebre mediterránea familiar puede ser un ejemplo de ello

Misericòrdia Ramon, Antònia Picornell y José A. Castro

Fuera de la isla de Mallorca, el significado de "chueta" apenas si va más allá de la acepción que le otorga el diccionario: en las Baleares, descendiente de judíos conversos. Sin embargo, en el archipiélago, el término representa para algunos un cúmulo de vivencias, la mayoría de ellas no muy agradables. Los chuetas mallorquines, descendientes de judíos sefarditas que se bautizaron y permanecieron en la isla, han sufrido, durante siglos, una historia de aislamiento muy particular.

Después de la expulsión de los judíos en España, decretada por los Reyes Católicos en 1492, algunos se convirtieron al catolicismo; ellos y sus descendientes siguieron en la península, asimilados, en general, por el resto de la población. En Mallorca no ocurrió así. Un grupo reducido de descendientes de judíos conversos mallorquines, denominado "chuetas", se mantuvo segregado en su barrio, su "call", hasta fechas recientes.

El término chueta podría derivar de "juetó" (diminutivo catalán de judío) o de "xulla" (panceta en catalán) en referencia a la norma hebrea de no comer carne de cerdo. Son considerados chuetas los individuos que portan alguno o varios de los 15 apellidos característicos —Aguiló, Bonnin, Cortés, Forteza, Fuster, Martí, Miró, Picó, Piña, Pomar, Segura, Tarongí, Valentí, Valleriola y Valls— y que han vivido mayoritariamente en el call del centro de la ciudad de Palma de Mallorca. Los apellidos en cuestión son de origen catalán, castellano o italiano, pero fuera de Mallorca no guardan ninguna relación con la etnia judía. No se consideran chuetas otros apellidos, como Salom o Abraham, pese a su clara connotación hebrea y su frecuencia en la isla.

El número de chuetas ha oscilado, según la época, entre 1500 y 7000 personas. Todos los historiadores han puesto de relieve la endogamia del grupo (tendencia a contraer matrimonio entre ellos), que se refleja, por ejemplo, en la cifra altísima de dispensas matrimoniales por parentesco. Pero este hecho no obedece sólo al tamaño reducido de la población, sino también a la existencia de clanes o asociaciones preferenciales entre ciertos apellidos, que todavía podemos observar hoy en día.

Desde el siglo pasado la antropología y la genética han venido estudiando las poblaciones humanas, con el propósito de establecer semejanzas y diferencias entre distintos grupos que permitan comprender mejor su origen y evolución. Con el tiempo han ido cambiando los métodos empleados. Mientras en un comienzo se trataba de esbozar comparaciones de rasgos morfológicos y físicos (medidas craneales, color de la piel y los ojos, etcétera), las nuevas técnicas posibilitan la obtención de información precisa sobre los genes que definen a los individuos de la población, ya sea a través de sus productos inmediatos, las proteínas, o de la propia estructura del gen, el ADN.

El tamaño ingente del genoma humano no permite abordar su estudio exhaustivo, ni siquiera en un número de individuos suficiente para representar a la población. Por ello, la genética de poblaciones ciñe su campo de trabajo a una fracción determinada de genes que puedan tomarse como una muestra al azar del genoma entero. Importa, a la hora de elegir esos genes, que sean polimórficos, es decir, que cada uno de ellos presente distintas variantes o alelos, y lo haga en una frecuencia que resalte en la muestra poblacional.

En este contexto, se han visto privilegiados los estudios de los polimorfismos sanguíneos, por la sencilla razón de que es más fácil trabajar con muestras de sangre que con otros tejidos humanos. Las muestras nos permiten apreciar el grupo sanguíneo (AB0 y Rh, entre los más conocidos), las enzimas eritrocitarias (por ejemplo, las esterasas y las fosfatasas) y las proteínas séricas (como la haptoglobina y la transferrina). Hemogrupos, enzimas y proteínas presentan distintas variantes, cuya síntesis está controlada directamente por los distintos alelos de cada gen. Conviene, asimismo, centrar el estudio en sistemas genéticos donde las frecuencias con que aparece cada alelo varíen de una población a otra o muestren ciertas variantes propias de una determinada población.

La frecuencia con que detectamos cierto gen en una población puede ser el resultado de distintos factores evolutivos. La selección favorece, o frena, la incidencia de determinados fenotipos en función de su capacidad de adaptación al medio; el proceso migratorio o de mezcla propaga a otras poblaciones un alelo surgido por mutación puntual en un lugar geográfico concreto. Cuando, por diversos motivos, merma el tamaño de una población, las frecuencias de los distintos alelos pueden sufrir cambios al azar; esta deriva genética, así se llama el fenómeno, puede originar también diferencias entre poblaciones.

A partir de un acervo genético común, los judíos han vivido subdivi-

MISERICORDIA RAMON, ANTONIA PICORNELL y JOSE A. CASTRO son profesores de genética en la Universidad de las Islas Baleares. Desde el año 1988 se dedican al estudio genético de poblaciones humanas, en especial de la comunidad chueta mallorquina.

didos en poblaciones dispersas por todo el mundo, que han permanecido aisladas unas de otras durante muchas generaciones. Ese aislamiento, la consanguinidad resultante del frecuente matrimonio endogámico, la mezcla con grupos circundantes no judíos y la influencia que sobre las poblaciones hebreas han podido desempeñar los diferentes ambientes donde han habitado, explican la diferenciación genética que se ha observado al estudiar las distintas comunidades judías. Aunque no existe unanimidad en la clasificación, se acepta la existencia de tres grupos judíos principales: orientales, sefarditas y askenazíes.

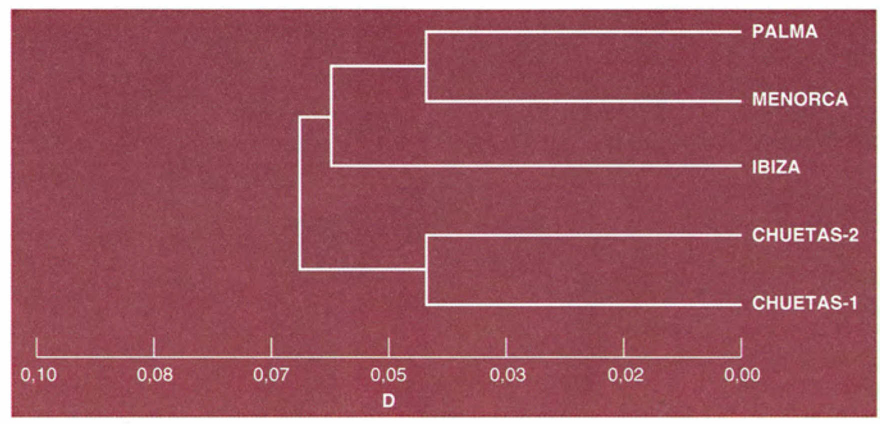
Los judíos orientales son los descendientes de una fracción de la población originaria que ha residido en Oriente Medio durante su larga historia. Se acepta que constituye el tronco de partida. Otra fracción del pueblo judío originario emigró hacia el oeste, y de ella surgieron los que con el tiempo serían los judíos sefarditas, es decir, españoles. Vivieron en España hasta el decreto de expulsión. En su dispersión, fueron asentándose en numerosos subgrupos, con comunidades en el norte de Africa, los Balcanes y Turquía. Los askenazíes adquieren su nombre de los primeros grupos que emigraron a Alemania, sobre todo en el curso de la Edad Media, y se extendieron luego por Europa central y del este. Han vivido en sociedades cristianas y, a diferencia de los dos grupos anteriores, no los podemos diferenciar en subgrupos étnicos.

La creación del estado de Israel, en 1948, puso de manifiesto, por una parte, la heterogeneidad física entre los grupos judíos procedentes de distintas regiones del mundo y, por otra, las semejanzas evidentes entre cada grupo y la población con la que habían convivido después de la Diáspora. Los estudios genéticos poblacionales realizados desde los años setenta hasta nuestros días no han llegado a conclusiones convergentes. Algunas investigaciones defienden una mezcla casi absoluta entre las poblaciones judías y las no judías con las que vivieron; otros autores, por contra, abogan por una gran similitud entre las distintas poblaciones de origen judío.

Contemporáneamente a la manifestación de esas discrepancias, el estudio de la genética empezó a preguntarse por la peculiar distribución de ciertas enfermedades hereditarias. Algunas parecían casi exclusivas de los judíos; tal era el caso de la fiebre mediterránea familiar (FMF), caracterizada por ataques recurrentes de fiebre y amiloidosis (formación de depósitos de proteína amiloide), exclusiva de los sefarditas; y también, la enfermedad de Tay-Sachs, detectada principalmente entre los askenazíes y que se define por la acumulación de sustancias lipídicas en los liposomas neuronales. En genética clínica, las frecuencias diferenciales de ciertas enfermedades se atribuyen, en parte, al efecto fundador (basado en la constitución genética del grupo originario) y, en parte, a la deriva gené-



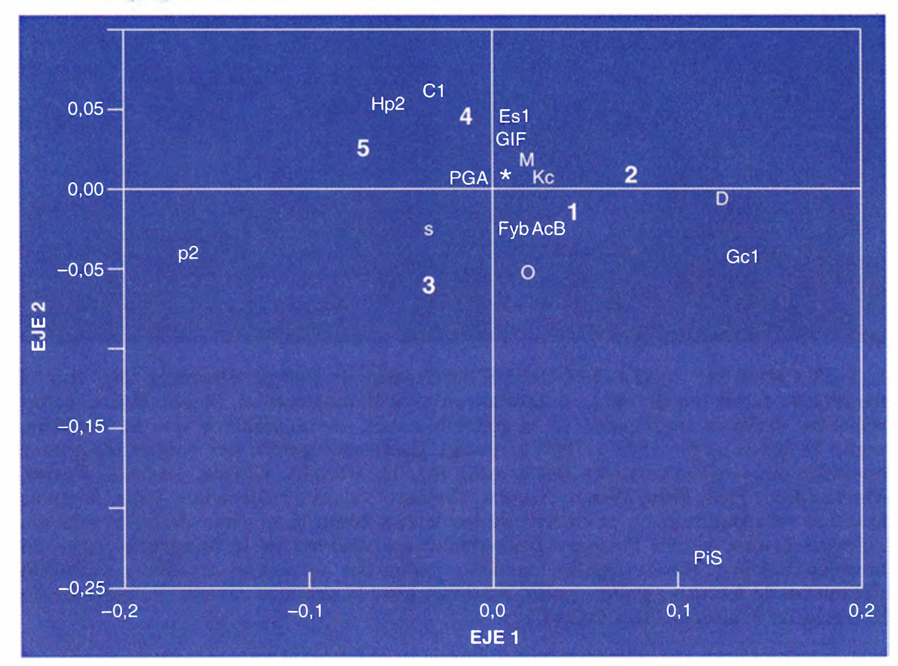
1. LOS CHUETAS MALLORQUINES descienden de judíos sefarditas que, tras el decreto de expulsión de 1492, se bautizaron y permanecieron en la isla. Hasta fechas recientes vivieron segregados en la judería o call, en un número que ha oscilado, según la época, entre 1500 y 7000 personas. De su endogamia nos hablan los quince apellidos más característicos del grupo: Aguiló, Bonnin, Cortés, Forteza, Fuster, Martí, Miró, Picó, Piña, Pomar, Segura, Tarongí, Valentí, Valleriola y Valls. Algunas familias sobresalieron en el cultivo de las letras, como el escritor de influencia romántica Tomás Aguiló Forteza (1812-1884), que aparece en la fotografía. Hijo del también escritor Tomás Aguiló Cortés y padre del destacado erudito y bibliófilo Estanislao de Kostka Aguiló Aguiló, fundó en 1840 la primera revista exclusivamente literaria de Mallorca, "La Palma".



2. DENDROGRAMA basado en las distancias genéticas de Edwards en las poblaciones de Baleares. Se da una correlación cofenética de 0,762. (La correlación cofenética es un parámetro que refleja la precisión del dendrograma con respecto a las distancias genéticas entre poblaciones; sus valores ocilan entre 0 y 1. A medida que nos acercamos a 1, el dendrograma presenta mayor calidad en la clasificación de las poblaciones.) Chuetas-1 son los judíos mallorquines por parte de madre o de padre; Chuetas-2 se refiere a individuos con un linaje chueta por parte de los dos progenitores.

tica, factor presente en poblaciones pequeñas y consanguíneas. Sin embargo, estas causas no son siempre los únicos factores determinantes.

¿Dónde quedan los chuetas? La particular historia vivida por esta comunidad judía la convierte en un interesante objeto de estudio. El análisis genético expresa la consanguinidad en el seno de la población chueta, descubre su grado de parentesco con otras poblaciones judías y da cuenta del nivel de mezcla con el resto de la población balear. Hemos realizado ese análisis mediante el estudio de 22 polimorfismos sanguíneos, empleando técnicas immunitarias de reacción entre antígeno y anticuerpo y electroforéticas, es decir, por separación de las proteínas aprovechando su distinta capacidad de carga eléctrica, cuando se las somete al campo eléctrico originado por una corriente continua.



3. ANALISIS FACTORIAL de correspondencias de las poblaciones de Baleares. Los dos ejes explican el 90,4 % de la variabilidad. Los números corresponden a las poblaciones: 1, Palma; 2, Menorca; 3, Ibiza; 4, Chuetas-2; 5, Chuetas-1. En letras se indica cada uno de los alelos de los sistemas estudiados. El asterisco corresponde a la superposición de los alelos Le y G6PD+. La relación entre un alelo y una población viene definida por su proximidad. Así, la población chueta está caracterizada por los alelos HP*2, ESD*1 y TF*C1 y GLO1*F; Palma lo está por el alelo ACP*B. El sistema P queda cerca de la población de Ibiza dada su alta frecuencia del alelo p2. La posición de Menorca está condicionada por la frecuencia del alelo D.

Nosotros venimos trabajando en la genética de los chuetas mallorquines desde 1988. En total, hemos analizado las peculiaridades hereditarias de 400 individuos de esa comunidad hebrea, de acuerdo con la relación de apellidos aceptada. Empezamos por separar en dos grupos a los sujetos de estudio, los Chuetas-1 y los Chuetas-2, según tuvieran linaje chueta por parte de uno o de los dos progenitores.

Llegamos a los resultados siguientes. En lo concerniente a los grupos sanguíneos, el alelo B del grupo AB0, el Fy^a del grupo Duffy, el S del grupo Ss y el P1 del sistema P presentan frecuencias dentro del rango de las observadas entre las poblaciones judías en general. Por lo que se refiere a las enzimas y otras proteínas, la frecuencia del alelo 1 de la esterasa-D (ESD) y las variantes S1 y S2 de la proteína orosomucoide (ORM1) también reflejan el carácter semítico de la población chueta. Por el contrario, el alelo D del grupo Rh y el alelo 1 de la proteína GC (componente grupal específico) se dan con una frecuencia más propia de las poblaciones del entorno mediterráneo que de las poblaciones judías. Los alelos de las proteínas alfa-1 antitripsina (PI), glioxalasa-1 (GLO1) y haptoglobina (HP) muestran una clara posición intermedia.

El parámetro que mide la cantidad de variación genética en el seno de una población se denomina heterozigosidad media, y no es otra cosa que la proporción de individuos portadores de dos alelos diferentes en todos los sistemas estudiados. Aplicada a la comunidad chueta, la hetorozigosidad media se cifra en 0,354, un valor sensiblemente menor que los observados en la mayoría de las poblaciones judías y no judías. Dicho de otro modo: los chuetas mallorquines guardan entre sí un parentesco genético mayor, favorecido por el tamaño restringido de la población integrante y el alto índice de consanguinidad o endogamia.

¿Se diferencian los chuetas del resto de la población palmesana (el grupo "Palma") con la que han convivido durante siglos? Para averiguarlo, comparamos ambas poblaciones mediante índices con significación estadística que permiten medir la divergencia genética entre una y otra. Del análisis estadístico se desprende que los chuetas, especialmente la muestra portadora de dos apellidos, diverge bastante de la población de Palma de Mallorca. Los chuetas de un solo apellido, como

población híbrida que son, ocupan una posición intermedia entre las otras dos poblaciones, "Chuetas-2" y "Palma", sin diferenciarse significativamente de ninguna de ellas. Al extender la comparación al resto de las Baleares (islas de Menorca e Ibiza), también observamos una divergencia genética significativa. En consecuencia, hemos de admitir que el conjunto de la población balear se estructura en subpoblaciones genéticamente diferenciadas.

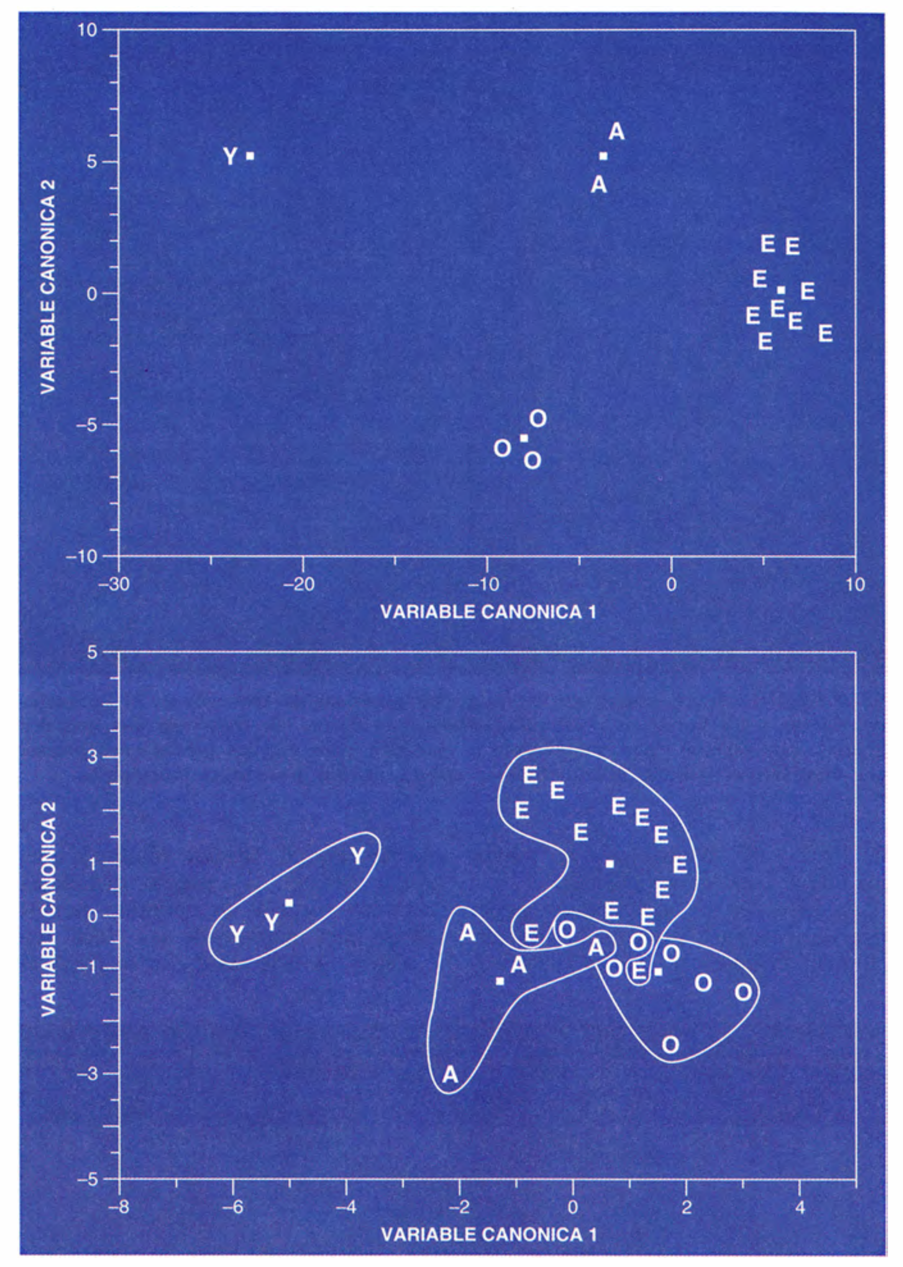
El grado de divergencia, o distancia genética, mide mediante índices estadísticos las diferencias entre las frecuencias de los distintos alelos. El resultado se plasma en unas representaciones gráficas denominadas dendrogramas. La mera observación de éstos nos revela ya que los chuetas, entendidos en sentido estricto de portadores de los dos apellidos, divergen no sólo de menorquines e ibicencos, sino también de sus propios vecinos palmesanos.

Para profundizar en la investigación en estudio acudimos a la estadística multivariante, conjunto de métodos estadísticos que permiten analizar e interpretar observaciones de más de una variable. Entre sus técnicas, esta estadística emplea la del análisis de componentes principales. Por tales se entienden las variables dotadas de varianza máxima, que resultan de la combinación lineal de las variables observables. Con el recurso a las componentes principales se pretende simplificar la estructura de los datos y así poder explicar, en pocas componentes, la mayor parte de la información que encierran las variables.

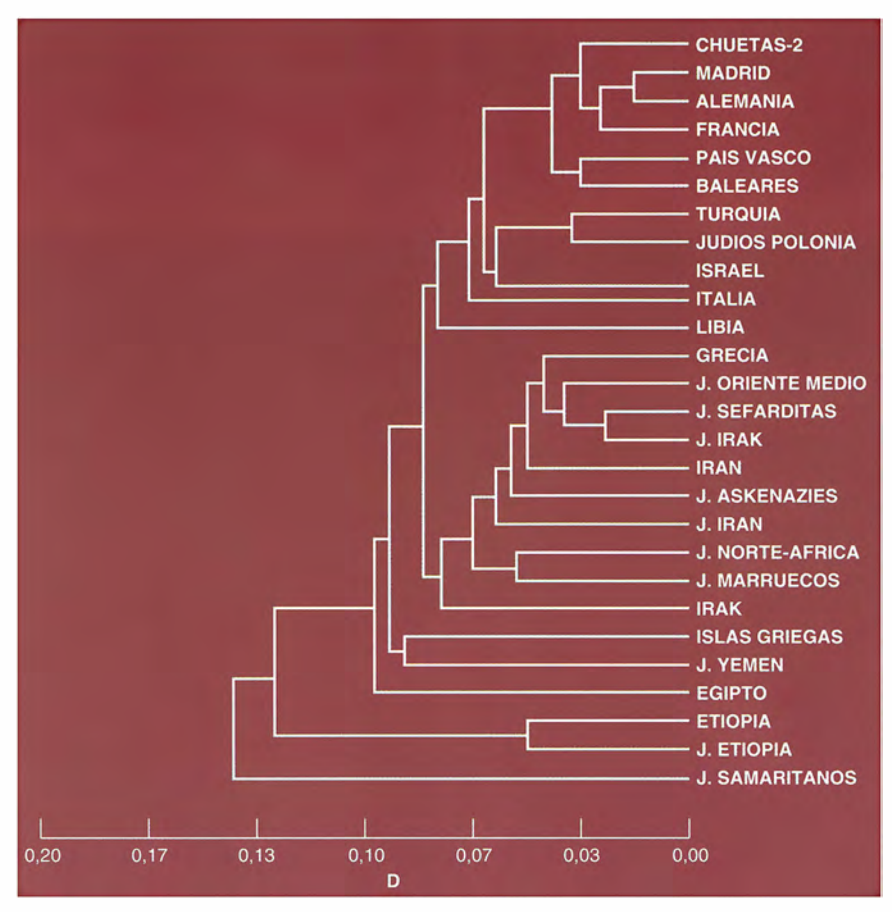
Aplicado a nuestros datos, el análisis de componentes principales nos indica cuáles son los factores que explican mejor la varianza de las variables estudiadas y cuáles son los que contribuyen, en mayor medida, a la diferenciación entre poblaciones. Las variables más informativas para este análisis fueron los sistemas DUFFY, ESD, PI, TF (transferrina) y AB0.

Otra técnica estadística multivariante, de mayor potencia informativa incluso, es el análisis factorial de correspondencias, que analiza conjuntamente las frecuencias génicas y las poblaciones. El resultado se plasma en una gráfica que evidencia el poder discriminatorio de unos marcadores en relación a otros, así como la asociación de los mismos a determinadas poblaciones. Este análisis vincula de manera preferente las variables TF*C1, ESD*1, GLO1*F y HP*2 a los chuetas.

De la conjunción de esas dos técnicas llegamos a la conclusión de que el archipiélago está estructurado en cuatro subpoblaciones. Tres de ellas se identifican, respectivamente, con los habitantes de las islas de Mallorca, Menorca e Ibiza; la cuarta subpoblación es la comunidad chueta. Desde el punto de vista genético, las poblaciones más próximas entre sí son las de Mallorca y Menorca, mientras que la chueta constituye la más alejada. Algunos alelos de los sistemas estudiados, preferentemente



4. ANALISIS DISCRIMINANTE. El gráfico superior corresponde a 15 poblaciones no judías: nueve europeas, dos norteafricanas, tres de Oriente Medio y una de Etiopía. Con E se simbolizan las europeas: Baleares, País Vasco, Madrid, islas griegas, Francia, Alemania, Italia, Grecia y Turquía; con A, las norteafricanas de Egipto y Libia; con O las de Oriente Medio (Irak, Irán y árabes de Israel) e Y designa la población etíope. El porcentaje de correcta clasificación es del 100 %. En el gráfico inferior se ilustra el análisis discriminante de las poblaciones anteriores con la inclusión de 12 poblaciones judías en su área geográfica de origen: cuatro europeas (chuetas, askenazíes, judíos de Polonia y sefarditas), cuatro de Oriente Medio (judíos de Irán, judíos de Irak, judíos de Oriente Medio y samaritanos), dos norteafricanas (judíos de Marruecos y un núcleo de judíos del norte de Africa: Tunicia, Argelia, Libia y Egipto) y dos (judíos etíopes y del Yemen) incluidos en Etiopía. El porcentaje de correcta clasificación es del 88,9 %. Tres poblaciones no quedan adecuadamente asignadas: la de Irán, englobada en Europa, y las de Turquía y sefarditas, que se clasifican en Oriente Medio, por su mayor similitud genética a las poblaciones de esta área geográfica.



5. DENDROGRAMA basado en las distancias genéticas de Edwards en 27 poblaciones judías y no judías. (Correlación cofenética = 0,910). Se observan dos grandes grupos, uno formado por poblaciones no judías y otro con las poblaciones judías, con algunas excepciones. Samaritanos y etíopes ocupan posiciones marginales.

de ESD y TF, contribuyen en mayor medida a esta diferenciación.

Al extender la comparación genética de los chuetas a poblaciones circunmediterráneas no judías (centro y sur de Europa, Oriente Medio y norte de Africa) se observó que éstas tampoco forman un conjunto homogéneo para ninguno de los "loci" estudiados. A este resultado se llegó al realizar el análisis con las siguientes 12 poblaciones: vascos, Madrid, Baleares, islas griegas, Francia, Alemania, Italia, Grecia, Turquía, Egipto, Libia y árabes de Israel, haciendo uso de los marcadores disponibles en todas las poblaciones. El estadístico Fst, que mide el nivel de estructuración del conjunto de una población en subpoblaciones, era altamente significativo para cada uno de los "loci" (excepto para el AK1), lo que demuestra el carácter genéticamente heterogéneo de las poblaciones de esta región. Las distancias genéticas nos indican una mayor proximidad de los chuetas con las poblaciones de su entorno en el área del Mediterráneo occidental y menor con las poblaciones del área oriental mediterránea; así, por ejemplo, la distancia entre los chuetas y la población italiana es de 0,012 unidades, mientras que su distancia con las islas griegas es de 0,022 o de 0,019 con los árabes de Israel.

¿Cuál es el grado de parentesco genético que existe entre los chuetas y otras poblaciones judías? De la comparación mediante el estadístico Fst resulta que las comunidades judías de regiones distintas constituyen poblaciones con rasgos genéticos diferentes. En esta divergencia entre comunidades desempeñan un papel importante aquellos marcadores sometidos a distintas presiones de selección natural, en función de diferentes factores ambientales de cada zona geográfica, como son el sistema Duffy y la enzima eritrocitaria glucosa-6-fosfato deshidrogenasa. Las poblaciones que viven en zonas propensas a episodios de malaria tienen una frecuencia más elevada de los alelos Fy (Duffy) y $G6PD^-$; el signo menos indica deficiencia en esa enzima.

La aplicación de otros análisis genéticos, como el de componentes principales o el factorial de correspondencia, nos confirma la elevada heterogeneidad que reina entre las poblaciones judías. Las distancias genéticas existentes entre ellas (en un rango de 0,003 a 0,131 aplicando el índice de distancia elaborado por Nei) son mayores que en los casos estudiados de poblaciones no judías (rango 0,001 a 0,038 para el mismo índice de distancia). Los chuetas siguen esta misma tendencia y se puede observar que la distancia existente entre los chuetas y el resto de las poblaciones judías es mucho mayor (con un rango de valores que van de 0,004 a 0,084) que entre chuetas y el resto de isleños baleáricos (de



6. EL ROSETON DE LA CATEDRAL DE PALMA, probablemente realizado por artesanos de origen judío, presenta forma de estrella de David.

0,005 a 0,008), así como también entre los chuetas y las poblaciones europeas y mediterráneas (de 0,007 a 0,028).

En los dendrogramas surgidos como representación gráfica de las distancias genéticas, no observamos separación entre judíos askenazíes y sefarditas, sino una agrupación de comunidades con residencia en Europa central (Polonia, Bulgaria, etcétera) frente a las poblaciones de otras zonas geográficas (norte de Africa, Irán, Irak y Yemen). Ello es así hasta el punto de que los judíos del norte de Africa (sefarditas) no guardan una proximidad genética más estrecha con otras comunidades sefarditas (de los Balcanes o Turquía, por ejemplo), pese a su origen común. Este fenómeno podría deberse al largo período en que los judíos norteafricanos han vivido en contacto con otros grupos raciales, con la mezcla consiguiente, así como a las peculiares condiciones ambientales a que se han visto sometidos.

Llama la atención el elevado grado de diferenciación (respecto a todas las poblaciones judías, y en especial a los judíos orientales) que muestran los samaritanos; éstos han permanecido siempre en Oriente Medio. Su alto grado de exclusividad o idiosincrasia podría deberse a la deriva genética, ya que se trata de una población muy pequeña y con un alto nivel de consanguinidad.



7. CALLE DEL CALL, o barrio judío, de la ciudad de Palma de Mallorca: barrio medieval de calles angostas y altas casas donde habitaban, dedicadas a la artesanía o al comercio, distintas generaciones de la misma familia.

Ante semejante heterogeneidad entre las diversas poblaciones judías dispersas por todo el mundo, ¿podríamos seguir atribuyendo a los judíos una unidad constituida por vínculos genéticos? Para resolver esa cuestión, comenzamos por investigar si las frecuencias génicas que presentaban los distintos sistemas polimórficos estudiados (grupos sanguíneos, proteínas séricas y enzimas eritrocitarias) asignaban correctamente las poblaciones judías y "gentiles" (no judías) a sus respectivas áreas geográficas. (Las áreas de residencia las hemos reunido por proximidad geográfica en cuatro: sur de Europa, norte de Africa, Oriente Medio y Etiopía.) Con ese propósito, empleamos un análisis estadístico muy apropiado, el discriminante.

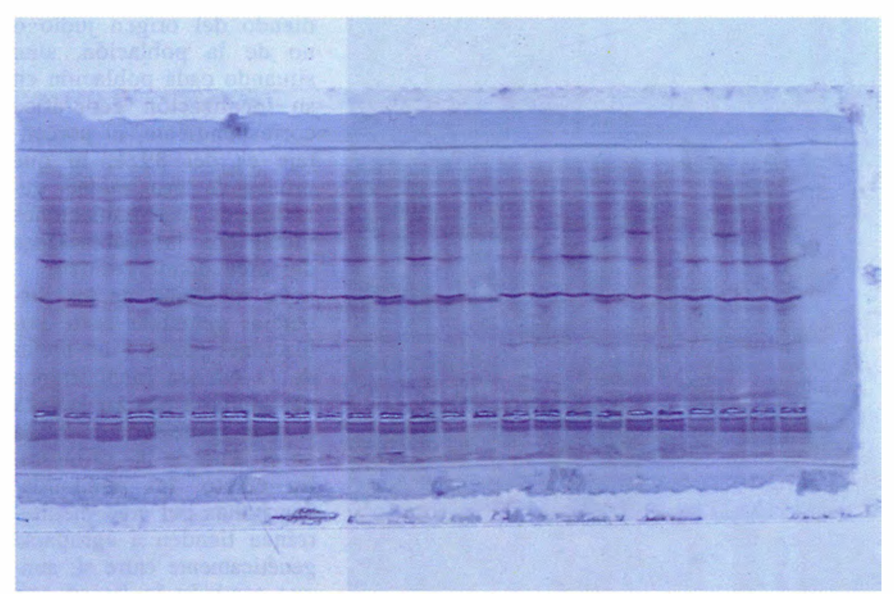
Por análisis discriminante se entiende una metodología estadística que agrupa las poblaciones en áreas espacialmente diferentes unas de otras, a partir de ciertas funciones (llamadas discriminantes) de las frecuencias de los marcadores posibles estudiados en las poblaciones. Estas funciones discriminantes definen regiones en el espacio, de tal forma que una población pertenece a una misma área si las coordenadas definidas por sus variables así lo establecen. Aplicado a nuestras muestras, nos reveló que, en las poblaciones no judías, los marcadores genéticos identifican a cada población con el área a la que geográficamente pertenecen, en un 100 % de los casos. Al introducir el conjunto de las poblaciones judías como un quinto grupo, el porcentaje de correcta clasificación es sólo del 55,6 %; mientras que, si aplicamos el análisis prescindiendo del origen judío o no de la población, sino situando cada población en su localización geográfica correspondiente, el porcentaje es del 89 %, lo que prueba la proximidad genética de las poblaciones judías con las poblaciones del área donde residen.

La medición de las distancias genéticas entre poblaciones judías y no judías de la cuenca mediterránea nos obliga a matizar la falta de homogeneidad observada en el seno de las primeras. En efecto, las comunidades judías del área mediterránea tienden a agruparse genéticamente entre sí; aunque también lo hacen con alguna población no judía del Mediterráneo oriental, por ejemplo Grecia. Sin salirnos del *Mare nostrum*, los samaritanos, los judíos del Yemen y los de Etiopía presentan, sin embargo, posiciones marginales en el dendrograma. Ello se debe al aislamiento y el reducido número de individuos en el caso de los samaritanos, y a las conversiones masivas al judaísmo que se dieron en determinados momentos históricos en las poblaciones yemenita y etíope.

En resumen, las poblaciones judías, aunque mantienen rasgos genéticos comunes distintivos, tienden a parecerse al resto de los habitantes del área geográfica donde han vivido. A su imagen, la comunidad chueta presenta rasgos de población hebrea, pero refleja también, sobre todo en determinados marcadores, los rasgos de las poblaciones de su entorno.

¿Qué mecanismos evolutivos condujeron a la diferenciación que se ha producido en la población chueta? La genética evolutiva da cuenta de diversos mecanismos que subyacen bajo el proceso de diferenciación: selección natural o artificial, migración o mezcla y la deriva genética. No es fácil, sin embargo, determinar el nivel de contribución de cada uno de ellos en un caso particular.

La mezcla o flujo genético entre los distintos grupos poblacionales humanos es un fenómeno habitual. Pero cuando las poblaciones implicadas son judíos y gentiles, ese trasie-



8. FENOTIPOS DE LA PROTEINA SERICA HAPTOGLOBINA obtenidos por isoelectroenfoque. Debido a su variabilidad y a las distintas frecuencias que presenta es un buen marcador para discriminar poblaciones judías de poblaciones no judías.

go sufre restricciones más o menos absolutas según el momento histórico. Si recordamos que los chuetas proceden del tronco judío originario, resulta obvio que su mezcla con vecinos no semitas en el transcurso de los años desempeñó un papel importante en la configuración genética de la población chueta actual.

Aunque no podemos conocer las frecuencias alélicas que presentaba la población chueta en un comienzo, sí hemos de suponer que eran similares a las de las poblaciones que en estos momentos viven en Oriente Medio. Para estimar la mezcla, utilizamos como población no judía los datos de los vecinos actuales de Palma de Mallorca, ciudad donde los chuetas han residido de forma preferente. Sólo hemos trabajado con los sistemas genéticos que presentaran frecuencias diferenciales entre las dos poblaciones y no fueran claramente objeto de la selección. Los valores de mezcla obtenidos varían según el sistema de que se trate, dando un valor medio de 0,59. Este valor de mezcla es intermedio entre los que podemos observar para otras poblaciones. Así, el flujo génico detectado entre poblaciones askenazíes y sus vecinos no judíos es menor; por contra, en la población judía del Yemen se dan valores mucho más elevados de mezcla con gentiles.

Entre los chuetas, era lógico esperar la existencia de una mezcla mayor que la hallada en otras comunidades hebreas europeas. En efecto, pese al recelo social, los matrimonios mixtos no tienen ningún impedimento legal desde el siglo XV, y desde el siglo XVII ningún impedimento religioso. Con todo, los chuetas actuales mantienen una parte considerable de información de lo que fue acervo genético original judío.

La deriva genética es otro factor evolutivo que puede contribuir a la divergencia entre grupos con un origen común. Su efecto promueve la diferenciación entre poblaciones si el número de reproductores es menor de 1000. Las poblaciones pequeñas, en ciertos momentos de su historia, pasan por reducciones de tamaño significativas, los denominados cuellos de botella. Se demuestra ese fenómeno, por ejemplo, en la aparición de enfermedades genéticas, normalmente homozigóticas recesivas.

Entre las poblaciones judías, la enfermedad de Tay-Sachs y la fiebre mediterránea familiar constituyen claros ejemplos de deriva genética. En el caso de la comunidad chueta, coincide además que el número de individuos censados es pequeño y variable, con escasos individuos reproductores efectivos por biología y edad, sin olvidar, asimismo, la persecución sufrida en determinados momentos. Por consiguiente, la deriva genética debió ejercer un efecto poderoso en la diferenciación de esa comunidad cerrada y restringida, aunque no fuera el factor decisivo.

El matrimonio endogámico, cuyo efecto genético se mide mediante el coeficiente de consanguinidad (F), revistió una importancia mucho mayor en el seno de la comunidad chueta. Son numerosísimas las licencias de matrimonio por parentesco que encontramos en los registros. Si estimamos el coeficiente F a partir de la isonimia (proporción de individuos que comparten idéntico apellido), encontramos un valor de 0,047, prácticamente igual al hallado en el cálculo genético a partir de las frecuencias alélicas y muy superior a los valores de F encontrados en judíos askenazíes (0,008) y sefarditas (0,029). La consanguinidad detectada entre estos últimos podría explicar la alta prevalencia de la fiebre mediterránea familiar (1/140 individuos en la población chueta) que se da en los sefarditas y también las frecuencias de algunos marcadores. Por otra parte, la selección natural puede haber actuado sobre algunos genes, por ejemplo los del sistema Duffy, pero sus efectos son difíciles de cuantificar.

En conclusión, podemos afirmar que la población chueta actual mantiene unas características genéticas propias que la diferencian de otras poblaciones y la sitúan en una posición intermedia entre las no judías de su entorno geográfico y las poblaciones judías. Las razones socioeconómicas que han marginado a la población chueta del resto de la población de Palma de Mallorca han mantenido un cierto grado de diferenciación genética entre ambos grupos. La segregación ha desaparecido, aunque se producen algunos hechos esporádicos que reflejan ese mutuo recelo. Dentro de unos años los chuetas serán objeto únicamente de estudios históricos, no de estudios genéticos, ya que la diferenciación de los chuetas desaparecerá casi con toda seguridad en las próximas generaciones.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE GENETICS OF THE JEWS. A. E. Mourant, A. C. Kopec y K. Domanieswska-Sobczak. Clarendon Press, Oxford, 1978.

ENZYMATIC POLYMORPHISM IN THE JEWISH COMMUNITY (CHUETAS) FROM THE MAJORCA ISLAND. A. Picornell, A. Miguel, J. A. Castro y M. M. Ramón, en *Gene Geography*, vol. 4, págs. 165-171, 1990.

BLOOD GROUPS IN THE CHUETA COMMUNITY (MAJORCAN JEWS). A. Picornell, J. A. Castro y M. M. Ramón, en *Human Heredity*, vol. 41, págs. 35-42, 1991.

PI AND TF SUBTYPES IN CHUETAS (MAJORCAN JEWS). A. Picornell, J. A. Castro y M. M. Ramón, en *Human Heredity*, volumen 42, págs. 321-323, 1992.

GENETIC MARKERS AND DISEASES AMONG THE JEWISH PEOPLE. Dirigido por B. Bonné-Tamir y A. Adam. Oxford University Press, Oxford, 1992.

El trabuco

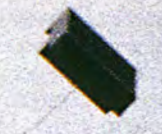
Fue el arma más poderosa de su tiempo. Modernas reconstrucciones y simulaciones informáticas ayudan a comprender mejor su funcionamiento

Paul E. Chevedden, Les Eigenbrod, Vernard Foley y Werner Soedel

Siglos antes del desarrollo de cañones eficaces, existieron grandes piezas de artillería que demolían las murallas de los castillos con proyectiles del peso de un piano. El trabuco, inventado en China entre los siglos V y III a.C., llegó al Mediterráneo hacia el siglo VI d.C. Desplazó a otras formas de artillería y se mantuvo vigente hasta bastante después de la aparición de la pólvora. Participó activamente en la rápida expansión de los imperios mongol e islámico y tuvo un papel importante en la transmisión de la "peste negra", la epidemia que asoló Eurasia y el norte de Africa durante el siglo XIV. Durante su larga vida tuvo ocasión de influir en el desarrollo de los mecanismos de relojería y en los análisis teóricos sobre el movimiento.

Los trabucos fueron los sucesores de las catapultas, que a su vez fueron una transformación de los arcos en máquinas (*véase* "Catapultas antiguas", por Werner Soedel y Vernard Foley; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1979). La energía de las catapultas se obtenía de la deformación elástica de cuerdas retorcidas, mientras que los trabucos se basaban en la fuerza de la gravedad o directamente en la fuerza humana, resultando bastante más eficaces.





Una catapulta de tamaño mediano lanzaba proyectiles que pesaban entre 13 y 18 kilos, llegando hasta 27 kilos en las más grandes de uso común. Sin embargo, según Filón de Bizancio, ni siquiera estas máquinas podían provocar grandes daños en las murallas a una distancia de 160 metros. En cambio, los trabucos más potentes podían lanzar proyectiles de más de una tonelada y su alcance máximo excedía el de la artillería precedente.

La recuperación del conocimiento perdido

Hace muy poco que hemos comenzado a reconstruir la historia y los principios del funcionamiento del trabuco. Hasta ahora no se había realizado el esfuerzo necesario para examinar exhaustivamente todos los datos disponibles y, sobre todo, no se había tenido en cuenta la literatura técnica islámica. El tratado técnico más importante que nos ha llegado sobre estas máquinas es el *Kitab aniq fi al-manajaniq* (*Libro de los trabucos*), escrito por Yusuf ibn Urunbugha al-Zaradkash en el año 1462. Es uno de los manuscritos árabes más profusamente ilustrados que conocemos y proporciona información detallada sobre su construcción y funcionamiento. Los textos de este tipo tienen una importancia especial porque ofrecen una visión única de la mecánica aplicada de las sociedades premodernas.

Por nuestra parte hemos construido además modelos a escala y hemos realizado simulaciones por ordenador, que nos han enseñado muchas cosas. Creemos haber desvelado así los principios del diseño del trabuco, básicamente ignorados desde la Edad Media. Y hemos encontrado pruebas históricas que adelantan la fecha de su difusión y que revelan el papel crucial que esta máquina desempeñó en el arte militar del medievo.

Hasta ahora los historiadores suponían que la difusión de los trabucos desde China hacia occidente ocurrió demasiado tarde para influir en la



1. RECONSTRUCCION MODERNA de un "asedio medieval" mediante el lanzamiento de un piano a través de la campiña inglesa. El trabuco, realizado siguiendo el modelo de los que se usaron en Europa y en Oriente Medio, ha lanzado objetos de hasta 500 kilos. Los mayores de sus antecesores históricos podían impulsar más de una tonelada. (Hew Kennedy y Richard Barr realizaron la reconstrucción en Shropshire. Su altura es de unos veinte metros.)













fase inicial de las conquistas islámicas, que tuvieron lugar del 624 al 656. Sin embargo, Chevedden acaba de demostrar que los trabucos llegaron al Mediterráneo oriental hacia finales del siglo VI, que se conocían en Arabia y que los ejércitos islámicos hicieron buen uso de ellos. El refinamiento técnico que posteriormente sería distintivo del Islam ya existía entonces.

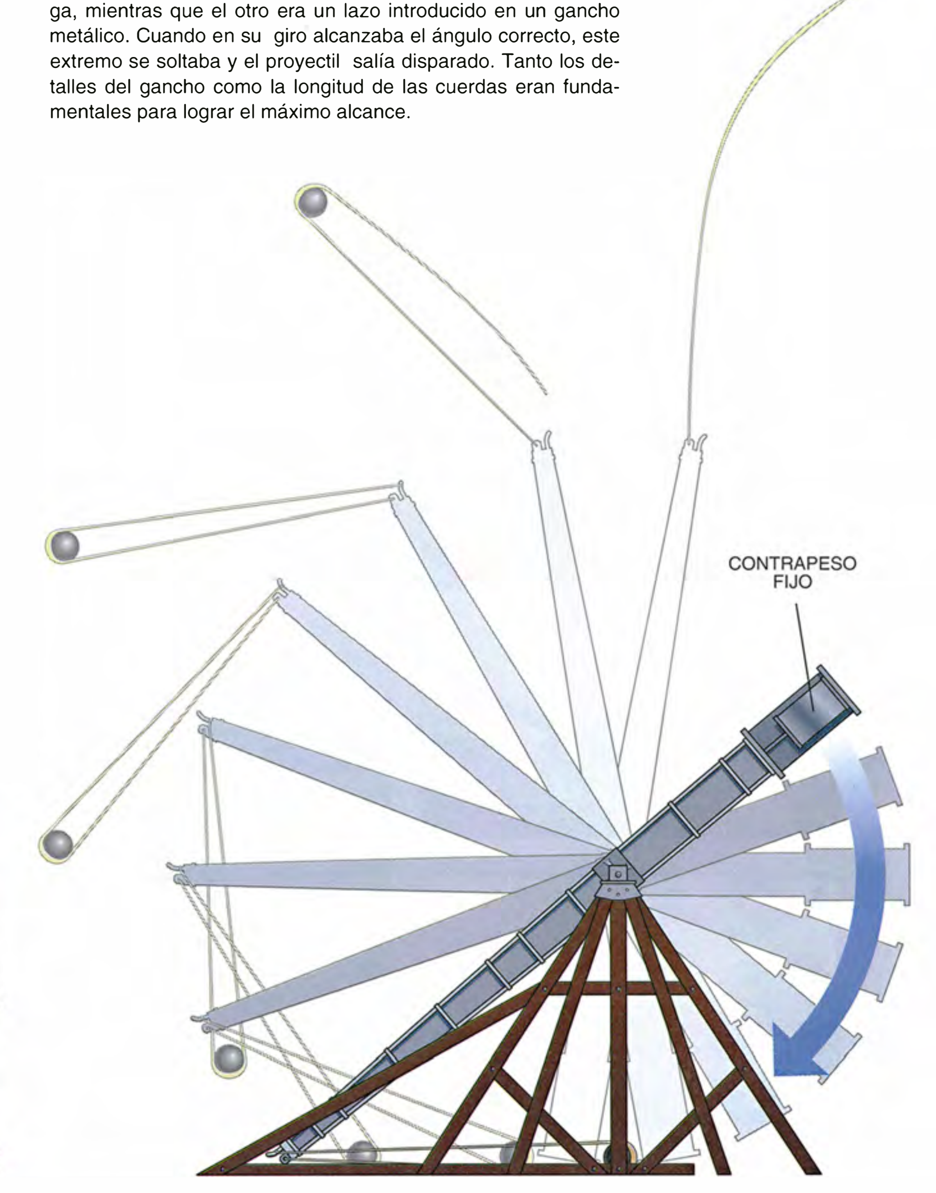
Las conquistas de los mongoles, las mayores conocidas de la historia de la humanidad, también debieron algo a esta arma. Como nación ecuestre, los mongoles empleaban ingenieros chinos y musulmanes para construir y manejar los trabucos en sus asedios. En el sitio de Kaffa, en 1345, fue la contribución del trabuco a la guerra biológica lo que provocó tal vez su impacto más devastador. Cuando las fuerzas mongolas asediaban esta posición avanzada de los genoveses en la península de Crimea, la "peste negra" se extendió entre sus filas. Los cadáveres de los afectados se arrojaron al interior de la ciudad y los mercaderes genoveses propagaron luego la enfermedad desde Kaffa a los puertos del Mediterráneo europeo.

El trabuco condicionó las tácticas guerreras, tanto defensivas como ofensivas. Los ingenieros aumentaron el espesor de las murallas para que resistiesen a la nueva artillería y rediseñaron las fortificaciones para poder emplear también trabucos contra

La física del trabuco

Los fundamentos del trabuco son bastante sencillos e inspiraron los estudios medievales sobre el movimiento, pero sus detalles son sutiles y requieren simulaciones por ordenador para interpretarlos con exactitud. Nos ha costado comprender la importancia que tiene la rotación del contrapeso en la transmisión de energía a la viga y, a su través, a la honda y al proyectil.

La honda tenía uno de sus extremos firmemente sujeto a la viga, mientras que el otro era un lazo introducido en un gancho metálico. Cuando en su giro alcanzaba el ángulo correcto, este extremo se soltaba y el proyectil salía disparado. Tanto los detalles del gancho como la longitud de las cuerdas eran fundamentales para lograr el máximo alcance.



TRACCION

Los primeros trabucos se accionaban mediante cuerdas tiradas por personas y no tenían contrapesos. Equipos de hasta 250 hombres tiraban de ellas para enviar los proyectiles a unos cien metros. Este es un ejemplo de máquina de tracción pequeña. La retención de la honda flexionaba la viga y aumentaba el alcance.

La adición de contrapesos aumentó la potencia del trabuco. La eliminación de las cuerdas dejó libre un espacio que permitió situar en la parte baja un surco que dirigía el proyectil; de este modo se podía alargar la honda y aumentar su alcance todavía más. La honda gira más deprisa una vez está en el aire, por lo que su longitud determina el ángulo de lanzamiento.

los asaltantes. Los arquitectos que trabajaron bajo el sultanato de al-Adil (1196-1218), hermano y sucesor de Saladino, introdujeron un sistema defensivo que utilizaba unos trabucos movidos por la fuerza de la gravedad y montados sobre plataformas en lo alto de los torreones, para impedir que la artillería enemiga se acercarse lo necesario para ser eficaz. Las torres, diseñadas inicialmente como posiciones artilleras, adquirieron enormes proporciones, como requería el emplazamiento de estos trabucos mucho más voluminosos, de modo que los castillos pasaron de ser recintos amurallados con unas pocas torretas a transformarse en grupos de enormes torreones unidos por pequeños paños de muralla. Las torres de las ciudadelas de Damasco, El Cairo y Bosra son estructuras macizas cuya sección llega a medir treinta metros cuadrados.

Sencillo pero devastador

El principio básico del trabuco era sencillo. El arma consistía en una viga que pivotaba sobre un eje excéntrico, por lo que uno de los dos brazos resultantes era más largo que el otro. El más largo terminaba en una honda o receptáculo para el proyectil y el más corto disponía de enganches para las cuerdas tractoras o de un contrapeso. En posición de lanzamiento, el extremo más corto estaba elevado; al soltar la viga, el extremo más largo subía con fuerza, lanzando el proyectil de la honda.

Se desarrollaron tres formas principales de trabucos: los de tracción, manejados por un grupo de operarios que tiraban de las cuerdas; los de contrapeso, activados por la caída de grandes pesos; y una forma híbrida que empleaba ambas fuerzas, la de la gravedad y la humana. Cuando las máquinas de tracción llegaron al mundo mediterráneo, a finales del siglo VI, sus posibilidades eran tan superiores a las de la artillería disponible que se decía de ellas que podían lanzar "montañas y colinas". Las máquinas híbridas más potentes manejarían proyectiles cuyo peso triplicaría y hasta sextuplicaría el de las mayores catapultas previas. Además podían hacer muchos más disparos en un tiempo dado.

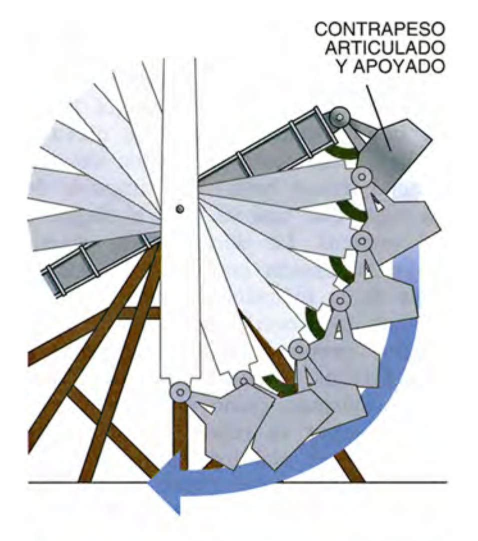
Las máquinas de contrapeso fueron todavía más allá. El cajón que lo albergaba llegó a tener el tamaño de una cabaña y a pesar decenas de miles de kilos. El proyectil del otro extremo de la viga puede que pesase entre 200 y 300 kilos, sabiéndose de algunos trabucos que lanzaban piedras de entre 900 y 1360 kilos de peso. Esto permitía disparar caballos muertos o grupos de cadáveres humanos. En una reconstrucción moderna realizada en Inglaterra se disparó un coche pequeño (que pesaba 476 kg sin motor) a ochenta metros, utilizando un contrapeso de treinta toneladas.

Los ingenieros modificaron los diseños primitivos tanto para aumentar el alcance, obteniendo la mayor energía posible de la caída del contrapeso, como la precisión, minimizando el retroceso. La diferencia más importante entre las máquinas de contrapeso y sus antecesoras de tracción es que la honda situada al final del brazo de la viga es bastante más larga. Este cambio afecta enormemente a su eficacia, pues incrementa la longitud efectiva del brazo propulsor. El hecho de que el ángulo al que se libera el proyectil sea ahora bastante independiente de la posición de dicho brazo posibilita toda otra serie de mejoras adicionales. Los ingenieros modificarían la longitud de las cuerdas de la honda para tratar de conseguir que el ángulo del proyectil al salir de la máquina fuese de unos 45 grados respecto de la vertical, con lo que se obtiene el máximo alcance.

Por otra parte, la honda debería

CONTRAPESO ARTICULADO

Las máquinas de contrapeso articulado avanzaron un paso más en la mejora de la eficacia con la que el trabuco transformaba la fuerza de la gravedad en movimiento del proyectil. El centro de gravedad del peso caía verticalmente durante la primera fase de aceleración; a medida que la bisagra se abría, la rotación del peso alrededor de su centro de gravedad se sumaba a la energía transmitida. Una vez disparado el proyectil, la continuación de la rotación ayudaba a frenar la viga, reduciendo los esfuerzos sufridos por la máquina. La suavidad con que funcionaba el trabuco evitaba tener que recolocarlo tras cada lanzamiento; podían hacerse, pues, muchos más disparos en un tiempo dado.



Los contrapesos apoyados fueron el medio por el que los ingenieros sacaron toda la energía posible del contrapeso. Forzándole a ocupar un cierto ángulo antes del disparo, le alargaron un poco la trayectoria. Esta innovación aumentó también la distancia entre el centro de gravedad del contrapeso y el eje de giro de la viga.

—Vernard Foley

PAUL E. CHEVEDDEN, LES EIGENBROD, VERNARD FOLEY y WERNER SOEDEL combinan sus conocimientos de historia y de ingeniería en sus estudios sobre el trabuco. Chevedden es un historiador especializado en tácticas de asedio premodernas y en fortificaciones. Los tres restantes autores pertenecen a la Universidad de Purdue, donde Eigenbrod y Soedel enseñan ingeniería mecánica y Foley historia de la ciencia y de la técnica.

2. LA CIUDADELA DE El Cairo (*en la foto*) se remodeló a principios del siglo XIII para adaptarla a los trabucos más potentes entonces utilizados, que eran de contrapeso. La muralla primitiva, de torres pequeñas y semicirculares (*de color azul en el plano*), fue reforzada por una serie de torreones bastante más voluminosos (*color rojo*) sobre los que se colocaban los trabucos utilizados para la defensa. Una ilustración del *Libro de los trabucos* (*abajo a la izquierda*) los muestra de ambos tipos, de contrapeso y de tracción, montados en la parte superior de una torre.

TORRES NUEVAS

TORRES ANTIGUAS

ACANTILADO (8,5 METROS DE ALTURA)

100 METROS



soltarse cuando el brazo estuviese casi vertical y el contrapeso cercano al final de su trayectoria, para que la mayor cantidad posible de la energía potencial del peso se convirtiese en energía cinética.

El balanceo libre

El desarrollo de un contrapeso articulado fue la siguiente innovación importante. Los cajones de estas máquinas cuelgan de una bisagra, formando ángulo con el brazo una vez montada el arma; cuando se dispara, el contrapeso se endereza. Este movimiento hace que su distancia al eje de la máquina varíe durante la trayectoria, lo que supone una ventaja mecánica.

El contrapeso basculante aumenta de modo apreciable la potencia suministrada al proyectil por medio de la viga. Los ingenieros medievales observaron que, en igualdad de condiciones, las máquinas de este tipo lanzaban los proyectiles más lejos que las de contrapeso fijo. Nuestros cálculos indican que las primeras suministran aproximadamente un setenta por ciento de su energía al proyectil. Pierden algo de energía cuando la bisagra se ha abierto por completo, momento en que la viga empieza a tirar del contrapeso.

La transferencia de energía hacia la honda, conforme ésta se eleva y voltea, y el coste energético del balanceo frenan bastante el impulso de la viga, que casi se para al llegar a la vertical. La deceleración disminuye la tensión que sufre la estructura de la máquina al salir despedido el proyectil, lo que la hace menos propensa a desplazarse o a dar brincos. Algunas piezas de artillería clásicas, como el onagro, eran famosas por su rebote y tenían que montarse en plataformas elásticas especiales. La mayor suavidad del funcionamiento del trabuco hacía innecesario reorientarlo entre disparos

sucesivos, ganándose en rapidez y puntería. Una máquina de tamaño modesto reconstruida por el Museo de Falsters Minder, en Dinamarca, da siempre en un blanco de 6 metros cuadrados a una distancia de 180 metros.

Las lecciones del trabuco

Los ingenieros trataron de comprender las causas de la gran potencia de los trabucos. Algunas de estas tentativas han quedado reflejadas en los archivos históricos como una proliferación de diseños de cajones para contrapesos, destacando el que se ajusta a la curva matemática conocida como "del salero". Fue la elegida para los proyectos más elaborados porque concentraba la masa a la mayor distancia posible de la bisagra, al tiempo que reducía el espacio necesario entre el contrapeso y la estructura. La misma forma volvió a aparecer en máquinas posteriores que incorporaron péndulos, como las sierras pendulares y otras máquinas-herramienta.

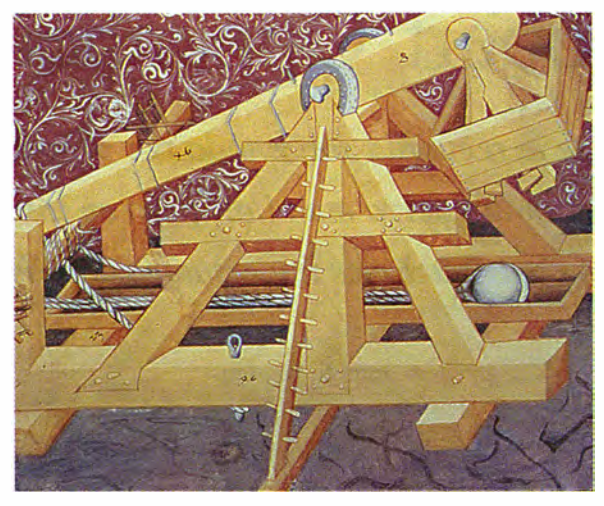
Muchos de los intentos realizados para aplicar a otras máquinas los principios del trabuco fracasaron por la imposibilidad de aprovechar con eficacia la energía de los contrapesos. Sólo se tuvo éxito en las destinadas a medir el tiempo, donde no era la gran potencia del trabuco lo que se buscaba, sino la regularidad de su movimiento.

Los péndulos significaron un notable avance en la precisión de los mecanismos reguladores. Aunque se les asocia habitualmente con Galileo y Christiaan Huygens, pueden encontrarse antecedentes en una familia de relojeros italianos conocidos de Leonardo da Vinci. El propio Leonardo dice explícitamente que algunos de sus diseños pueden usarse para medir el tiempo. Algunos de sus dibujos incluyen una bisagra entre el eje y el contrapeso del péndulo, como colgaban los contrapesos de los trabucos más desarrollados, mientras que otros tienen notable parecido con las máquinas de contrapesos fijos. El regulador de velocidad de los primeros relojes se parecía mucho al contrapeso "de salero", tanto estructural como dinámicamente, ya que oscilaba sobre su eje como lo hacía el contrapeso al final de un disparo.

Se diría que los trabucos también tuvieron algo que ver con el único gran avance medieval en el campo de las ciencias físicas: las innovaciones introducidas por Jordano de Nemore en la mecánica teórica. El concepto clave para entender su aportación es el de "gravedad posicional", un brote medieval de la idea de "vector de movimiento" o de "direccionalidad de una fuerza". Jordano sostuvo que, para distancias equivalentes, un peso "pesaba más", es decir, podía realizar más trabajo, si su trayectoria de descenso era vertical que si era oblicua. En concreto, comparaba supuestos de caída libre con otros curvilíneos. A la larga esta idea llevó a la noción de que el trabajo es proporcional al peso y a la distancia vertical recorrida, con independencia de la trayectoria seguida por el móvil.

La conexión es clara. Los ingenieros sabían que las máquinas de contrapeso articulado, cuyo peso descendía verticalmente durante la primera parte del ciclo del lanzamiento, disparaban las piedras más lejos que las equivalentes de contrapeso fijo, que describe una trayectoria curva.

Puede que también otros aspectos del trabajo de Jordano tuviesen que ver con la ingeniería militar. La suspensión de los contrapesos articulados, que produce un cambio continuo del apalancamiento, pudo incitarle a analizar el equilibrio de las palancas sometidas a flexión, lo que le llevó a la conclusión de que era la distancia horizontal que había entre la masa de un brazo de palanca y su fulcro la que determinaba el trabajo que podía realizar. La observación de las distintas distancias a las que lanzaban sus proyectiles las máquinas de contrapeso fijo y las articuladas puede que le resultase útil cuando trataba de definir el concepto de trabajo como el producto de la fuerza por la distancia.



3. EL TRABUCO DE CONTRAPESO fue el pilar básico de la artillería medieval. Esta ilustración del *Bellifortis*, de Conrad Kyeser, muestra las dimensiones de la viga principal (46 pies para el brazo largo y 8 pies para el corto) y de algunas de las otras partes. El texto, incompleto por la muerte de Kyeser en 1405, no describe la máquina con detalle.

Cuando ahora se exponen las ideas de Jordano suele hacerse como si fuesen ejemplos de física pura, basados en las enseñanzas de Arquímedes y de otros filósofos naturales precedentes. Los parecidos entre sus teorías mecánicas y el funcionamiento del trabuco llevan a pensar, sin embargo, en que puede que la práctica ingenieril estimulase a la teoría. El círculo se cierra cuando Galileo incorpora luego las ideas de desplazamiento virtual, trabajo virtual y análisis de los planos inclinados de Jordano para sustentar la nueva mecánica, que su análisis de la trayectoria de un disparo de cañón hizo famosa.

Las teorías innovadoras de Galileo se produjeron tras la sustitución de los trabucos por los cañones, un proceso que llevó casi dos siglos y que no quedó totalmente terminado hasta que los proyectiles metálicos sustituyeron a las piedras. El último caso conocido de uso del trabuco procede del Nuevo Mundo. Durante el asedio a Tenochtitlán (Ciudad de México) en 1521 Cortés aceptó de buen grado la propuesta de hacer un trabuco, pues la munición estaba disminuyendo de modo alarmante. Se tardó unos cuantos días en construirlo. Al primer disparo, la piedra subió verticalmente y, como es lógico, volvió a caer sobre la propia máquina, destruyéndola. Sirva esto de aviso para los eventuales constructores de réplicas: estos dispositivos tienen una potencia tremenda y se necesita habilidad para hacerlos funcionar correctamente.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CHINA'S TREBUCHETS, MANNED AND COUNTERWEIGHTED. Joseph Needham en *On Pre-modern Technology and Science: Studies in honor of Lynn Whyte Jr.* Dirigido por Bert S. Hall y Delno C. West. Undena Publications, 1976.

ARTILLERY IN LATE ANTIQUITY: PRELUDE TO THE MIDDLE AGES. Paul E. Chevedden en *The Medieval City under Siege.* Dirigido por Ivy Corfis y Michael Wolfe. Boydell & Brewer, 1995.

SCIENCE AND CIVILIZATION IN CHINA, Volumen 5: CHEMISTRY AND CHEMICAL TECHNOLOGY, Parte 6: MILITARY TECHNOLOGY: MISSILES AND SIEGES. Joseph Needham y Robin D. S. Yates. Cambridge University Press, 1995.

J. Robert Oppenheimer

A Oppenheimer se le recuerda sobre todo por la influencia que tuvo durante la segunda guerra mundial; pero en los años treinta hizo muchas contribuciones importantes a la física teórica

John S. Rigden

Hace cincuenta años, el 16 de julio de 1945, poco antes del amanecer, una explosión prodigiosa incendió el cielo del desierto de Nuevo México. Entre los testigos de este acontecimiento estaban muchos de los físicos más notables de este siglo. Mientras contemplaban el ardiente resplandor, protegidos por gafas de soldador, se apoderó de ellos una idea preocupante: había empezado la era nuclear. El testigo principal, el hombre que había dirigido el proyecto de la bomba atómica desde el inicio, era J. Robert Oppenheimer.

Oppenheimer fue un individuo singular. Su agudeza intelectual, sus muchos intereses, la fragilidad de su físico y lo etéreo de su personalidad le otorgaron proporciones legendarias. Tras la segunda guerra mundial se hizo famoso por haber dirigido a los físicos que construyeron la bomba atómica en el laboratorio de Los Alamos. Su éxito como director del proyecto Manhattan le convirtió en una personalidad influyente y, durante cierto tiempo, disfrutó de la autoridad y el poder que le correspondían.

Pero en junio de 1954, en medio de la paranoia anticomunista del macartismo, la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos (AEC) llegó a la conclusión de que el carácter de Oppenheimer tenía defectos que le convertían en un riesgo para la seguridad nacional. Albert Einstein y otros miembros del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, Nueva Jersey, cuyo director era por entonces Oppenheimer, le prestaron su apoyo. En octubre, los consejeros del Instituto le reeligieron director, cargo que conservó hasta un año antes de su muerte, en febrero de 1967. Pero, tras las acciones de la AEC, su liviana figura era la de un hombre destrozado.

Los historiadores han escrito poco acerca del Oppenheimer que, diez años antes de la guerra, dio vigor a la física teórica estadounidense, lo que es una pena por varias razones. La primera es que se hizo físico en el más singular de los momentos, cuando se estaban formando las teorías de la mecánica cuántica y de la física nuclear y se revisaba buena parte del pensamiento tradicional al respecto. La segunda es que hizo muchas contribuciones importantes en diversas áreas de la física antes de ponerse al frente de Los Alamos, aunque a veces se diga que logró menos de lo que prometía.

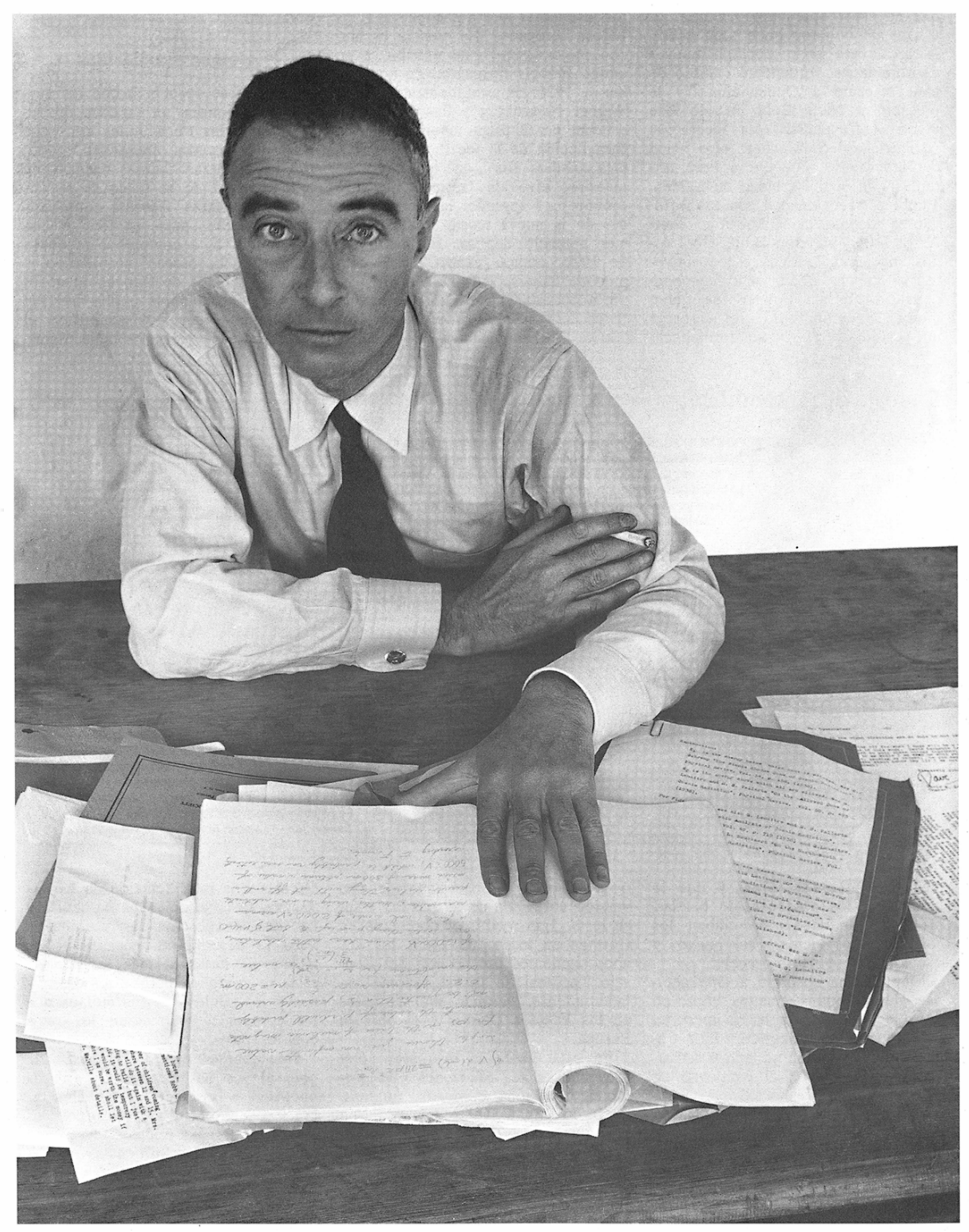
Así, por ejemplo, sentó los fundamentos de las investigaciones contemporáneas de la física molecular; fue el primero en reconocer el efecto túnel, fenómeno mecanocuántico que es la base de la microscopía de barrido por efecto túnel, con la que se descubre la estructura de las superficies átomo a átomo; estuvo a punto de predecir la existencia del positrón, la antipartícula del electrón; planteó varias dificultades cruciales de la teoría de la electrodinámica cuántica; desarrolló la teoría de los chaparrones de rayos cósmicos; y, mucho antes de que las estrellas de neutrones y los agujeros negros formaran parte de nuestro paisaje celeste, demostró que las estrellas de gran masa pueden derrumbarse bajo la influencia de las fuerzas gravitatorias.

De la química a la física

Como muchos físicos de su época, Oppenheimer estudió primero química. "Comparada con la física", decía, "va derecha al meollo de las cosas". Recién llegado a la Universidad de Harvard comprendió que "lo que me gustaba de la química se parecía mucho a la física", así que a la hora de elegir facultad para su licenciatura sometió una lista de asignaturas al departamento de física. Se apuntó a muchas clases de física, pero también a muchas otras que le interesaban de otras áreas. Solía decir que, durante estos años, no recibió más que "un baño muy rápi[do], superficial y apasionado de algu[na]s partes de la física". Y confesa[ba]: "Me gustaba trabajar, pero me d[es]perdigué mucho y me salió bien [d]e milagro; saqué sobresaliente en m[u]chas asignaturas en las que no cr[e]a merecerlo."

Sea o no verdad, Oppenheimer [ad]quirió sólida experiencia en el la[bo]ratorio de Percy W. Bridgman, pri[vi]legio que obtuvo por sus eleva[da]s calificaciones. En los años veinte [do]minaban la física estadounidense [ex]perimentadores como Bridgman, [un]o de los primeros investigadores de [la]s propiedades de la materia sometid[a] a altas presiones y constructor de b[ue]na parte de los aparatos requeri[do]s para ello. La distinción entre la fí[si]ca experimental y la teórica no [er]a, pues, una idea nítida en la mente [de]l joven Oppenheimer. La física teór[ic]a se consideraba en buena medida [un]a actividad europea. "No sabía [qu]e uno pudiese ganarse la vida de [es]a manera [como físico teórico]", [di]jo una vez recordando sus días de [es]tudiante universitario.

En consecuencia, al acercarse [su] licenciatura en 1925 quiso trab[aj]ar con Ernest Rutherford, uno de [lo]s mayores experimentadores del si[gl]o, en el laboratorio Cavendish de Ca[m]bridge, Inglaterra. Rutherford ha[bí]a realizado los experimentos en los [qu]e se descubrió que los átomos con[te]nían unos cogollos pequeñísimos y pesados, los núcleos. Pero las [cr]edenciales de Oppenheimer no imp[re]sionaron a Rutherford, que rech[az]ó su solicitud. Oppenheimer escri[bi]ó entonces a Joseph John Thoms[on], otro renombrado experimentador [de]l Cavendish. Este le aceptó como [es]tudiante investigador y le puso [en] una esquina del laboratorio a depos[it]ar películas delgadas sobre una base [d]e colodión. "Lo estoy pasando [m]uy mal", le escribió a un amigo del [ba]chillerato en noviembre de 1925. [E]l trabajo del laboratorio es aburridi-



Oppenheimer, 1904-1967

mo y lo hago tan mal que me parece que no estoy aprendiendo nada."

Tras un invierno poco prometedor, la primavera trajo consigo nuevas oportunidades. Rutherford cambió de idea respecto a Oppenheimer y le presentó a Niels Bohr cuando éste visitó el Cavendish; por mediación de Patrick M. S. Blackett, otro físico del laboratorio, conoció a Paul Ehrenfest, de la universidad de Leiden. También trabó amistad con los influyentes físicos de Cambridge Paul A. M. Dirac y Ralph H. Fowler. Todos ellos eran teóricos y contribuyeron a que se ampliase su concepto de la disciplina. Fowler fue quien mejor le comprendió; le aconsejó que estudiase el nuevo formalismo mecanocuántico de Dirac y que lo aplicase a los espectros de bandas, problema donde se mezclaban los conocimientos viejos y los nuevos y que aún no se había resuelto.

El problema absorbió a Oppenheimer durante unos cuantos años, en los que desarrolló la teoría moderna de los espectros continuos. Este trabajo no sólo originó su primer artículo, sino que marcó el comienzo de su carrera como físico teórico. Cuando Max Born visitó el Cavendish en el verano de 1926 y le sugirió que siguiese sus estudios de doctorado en la universidad de Gotinga, un bastión de la física teórica, aceptó sin titubear. "Me sentí completamente liberado de la obligación de tener que volver al laboratorio", le dijo al filósofo Thomas S. Kuhn durante una entrevista realizada en 1963.

Oppenheimer conoció en Gotinga los problemas que preocupaban a los físicos europeos. "La ciencia es mucho mejor [aquí]", le escribió a su amigo Francis Furgusson en noviembre de 1926. En esos momentos, Born, Werner Heisenberg y Pascual Jordan estaban en Gotinga, ocupados en la formulación de la teoría de la mecánica cuántica. Born, que era muy buen maestro, hizo de Gotinga un sitio óptimo para aprender las complejidades de la nueva teoría. Y Oppenheimer aprendió deprisa. En diciembre de 1926, apenas cuatro meses después de haberse matriculado allí, envió a la destacada revista alemana de física *Zeitschrift für Physik* un artículo "Sobre la teoría cuántica de los espectros continuos". Se trataba de una versión abreviada de la que iba a ser su tesis. Tras recibir el doctorado en Gotinga en marzo de 1927, los dos años siguientes fue becario del Consejo Nacional de Investigaciones estadounidense, pasando uno de ellos en los Estados Unidos y el otro en Europa.

En esta época le resultaron muy provechosas sus relaciones con prominentes físicos europeos, quienes, según le dijo a Kuhn, le orientaron y le pusieron en contacto con la física de verdad. No obstante, los problemas que investigaba eran fundamentalmente los que él mismo elegía. En los años posteriores colaboró estrechamente con físicos experimentales, muchos de los cuales reconocieron que entendía sus datos mejor que ellos mismos; sin duda le ayudaba su experiencia previa de laboratorio.

Atomos y moléculas

Cuando se descubrió que los átomos emitían un espectro discreto durante las transiciones entre sus diferentes estados energéticos sonaron las primeras alarmas respecto de la corrección de la física de los siglos precedentes. Atomos y moléculas constituían, pues, en 1927 el crisol natural para comprobar la nueva teoría de la mecánica cuántica y también la valía de Oppenheimer. Su primera contribución importante fue dar con una manera de simplificar el análisis de los espectros moleculares. Gracias a la interpretación de los espectros se determinan la estructura y las propiedades de las moléculas. Pero la descripción mecanocuántica exacta de hasta la más sencilla de ellas se complica porque los electrones y los núcleos de los átomos que las componen interactúan los unos con los otros.

Oppenheimer cayó en la cuenta de que, al ser tan dispares las masas nucleares y las electrónicas, cabía ignorar sus interacciones casi por entero. Los pesados núcleos reaccionan tan despacio a las influencias mutuas que los electrones completan varios ciclos de su movimiento antes de que los núcleos hayan descrito siquiera una pequeña parte de los suyos. Mientras estaba de vacaciones, redactó un escrito breve sobre el tema y se lo envió a Born. A éste

La forja de un científico

1925–1927

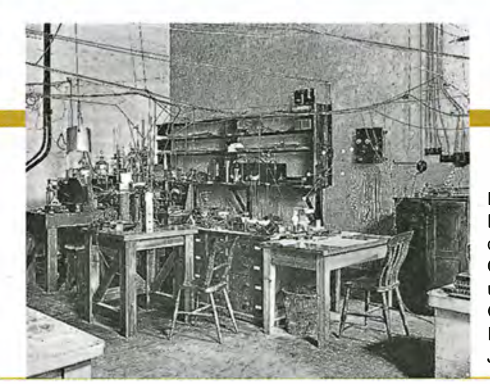
PERCY BRIDGMAN (*a la izquierda*) le pidió al estudiante Oppenheimer que trabajase en su laboratorio de la universidad de Harvard. Bridgman fue uno de los pioneros de la física de alta presión durante los años veinte y construyó buena parte del equipo que hacía falta para sacar adelante sus investigaciones. Su manera de proceder, "manchándose las manos", influyó con toda probabilidad en la decisión de Oppenheimer de dedicarse a la física experimental tras licenciarse en 1925.

1925

1926



1927



EL LABORATORIO CAVENDISH de Cambridge, Inglaterra (a derecha e izquierda), fue la casa de Oppenheimer durante un año tras dejar Harvard. Quería trabajar allí con Ernest Rutherford, pero a éste, uno de los mayores experimentadores del siglo, Oppenheimer no le produjo buena impresión inicial. Fue ayudante de otro renombrado físico del Cavendish, Joseph John Thomson (*arriba*).

le dejó atónito la brevedad de ese borrador y pergeñó un artículo de una treintena de páginas donde mostraba con detalle que la vibración y la rotación de los núcleos se podían tratar con independencia del movimiento de los electrones. La aproximación de Born-Oppenheimer es hoy el punto de partida para los físicos y los químicos que se dedican al análisis molecular. Luego Oppenheimer determinó la probabilidad de que un átomo capture a un electrón de otro átomo. Ateniéndose a la aproximación de Born-Oppenheimer, mostró que la probabilidad es independiente del potencial internuclear entre los dos átomos.

Oppenheimer fue el verdadero descubridor, en 1928, de otro fenómeno mecanocuántico, el efecto túnel. Hay diversas circunstancias teóricas que conducen a él, como la de un electrón que se comporte como una bola de billar infinitesimal, en cuyo caso puede escapar de los límites que normalmente le tienen confinado. El ejemplo más común de efecto túnel es el que se produce cuando un núcleo expele una partícula alfa durante la desintegración radiactiva. Las fuerzas nucleares y las electrostáticas restringen los movimientos de una partícula alfa dentro de un núcleo de uranio de tal modo que, desde el punto de vista clásico, no tiene forma de abandonarlo. Mecanocuánticamente, en cambio, puede atravesar la barrera que la rodea y deslizarse fuera, como por un túnel.

En el verano de 1928 tanto George Gamow como, por su parte, Edward U. Condon y Ronald W. Gurney explicaron la desintegración radiactiva por medio del efecto túnel. Los autores de libros de texto así lo reconocen, pero implícitamente dan a entender que fueron ellos quienes descubrieron el fenómeno, lo que no es verdad. Varios meses antes, en marzo, Oppenheimer había remitido a los *Proceedings of the National Academy of Sciences* un artículo que ponderaba el efecto que un campo eléctrico tiene sobre un átomo. Según la física clásica, un átomo no puede disociarse más que mediante un campo eléctrico intenso, pero, según el punto de vista cuántico, un campo débil puede separar un electrón del átomo al que pertenece porque el electrón puede atravesar, mediante el efecto túnel, la barrera que lo mantiene ligado a él. Oppenheimer mostró que un campo eléctrico débil podría extraer electrones de la superficie de un metal. Medio siglo después, en 1982, Gerd Binnig y Heinrich Rohrer, del Laboratorio de Investigación de IBM en Zurich, desarrollaron el microscopio de barrido por efecto túnel, basado en tal principio [*véase* "El microscopio de efecto túnel", de Gerd Binnig y Heinrich Rohrer; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1985].

1928–1930



1928

AQUI SE VE A OPPENHEIMER en 1928, un año después de haber recibido su doctorado en la universidad de Gotinga, donde Max Born, Werner Heisenberg y Pascual Jordan estaban formulando la teoría de la mecánica cuántica. Ese mismo año descubrió el efecto túnel mecanocuántico al poner de manifiesto que un campo eléctrico débil podía extraer electrones de una superficie metálica. Este es el principio en que se basa el microscopio de barrido por efecto túnel (*a la derecha*), inventado medio siglo después.

1929



1930

PAUL A. M. DIRAC (*izquierda*) ideó una ecuación de ondas relativista que describía el electrón en 1928. Su trabajo, aunque exacto en muchos aspectos, suscitó varios problemas perturbadores. Oppenheimer criticó perspicazmente la teoría de Dirac y, al desarrollar su argumentación, estuvo a punto de predecir la existencia del positrón.

Partículas y campos

Los últimos meses que Oppenheimer pasó en Europa, de enero a junio de 1929, estuvo con Wolfgang Pauli en el Instituto Federal Suizo de Tecnología en Zurich. Tras los años de aprendizaje, su interés se había desplazado de las aplicaciones de la mecánica cuántica a cuestiones más básicas de física. El momento en que dio ese paso fue el mejor posible. En la primavera de ese mismo año recibió ofertas del Instituto de Tecnología de California y de la Universidad de California en Berkeley; en ambos lugares las investigaciones físicas apuntaban a la frontera más avanzada de las cuestiones básicas. En Caltech estaba Robert A. Millikan, que había acuñado la expresión "rayos cósmicos" en 1925; en Berkeley investigaba la física nuclear Ernest O. Lawrence, inventor del ciclotrón en 1930. Oppenheimer aceptó los dos puestos; lo normal era que pasase el período de otoño en Berkeley y el semestre de primavera en Caltech. En ambos centros tuvo alumnos destacados que contribuyeron a situar a la física estadounidense entre las mejores del mundo.

Una de las polémicas más acaloradas de principios de los años treinta fue la que se centró en una teoría propuesta por Dirac. El 2 de enero de 1928 el director de los *Proceedings of the Royal Society* recibió un manuscrito de Dirac titulado "La teoría cuántica del electrón". Este artículo, y su segunda parte publicada al mes siguiente, contienen seguramente el logro más importante de

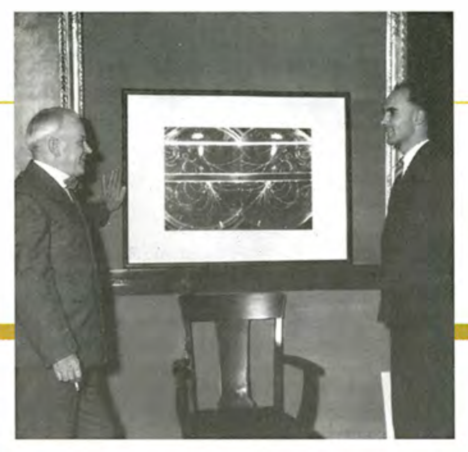
Dirac. Su ecuación de ondas relativista, concebida para describir el electrón, emocionó a los físicos porque obtenía el espín de la partícula y su momento magnético correctos, pero también planteaba problemas inquietantes. Heisenberg le escribió a Pauli en julio de aquel año que "el capítulo más triste de la física moderna es y va a seguir siendo la teoría de Dirac". El principal problema de la ecuación estribaba en que daba soluciones tanto para los estados de energía positiva como para un número infinito de estados de energía negativa. En semejante situación la mecánica cuántica predice que los electrones podrían saltar a esos estados de energía negativa y, por lo tanto, terminar todos allí. En consecuencia, los electrones ordinarios no deberían existir.

Para sortear esta dificultad, Dirac imaginó que esos estados de energía negativa estaban ocupados por un número infinito de electrones. Pero si unos cuantos de esos estados estuviesen sin ocupar, aparecerían en forma de huecos positivos en un mar de carga negativa. En marzo de 1930 Dirac publicó un artículo en el que afirmaba que esos huecos positivos eran protones. Pero Oppenheimer, que leyó el texto de Dirac antes de su publicación, arguyó en una carta publicada ese mismo mes en la *Physical Review* que no era así. Señalaba que, si los huecos positivos de la teoría de Dirac fuesen protones, los electrones y los protones se aniquilarían mutuamente, lo que querría decir que la vida media de la materia ordinaria sería de unos 10^{-10} segundos. Hizo notar además que las partículas positivas propuestas por la teoría de Dirac habían de tener la misma masa que los electrones. En realidad esos huecos positivos eran los positrones, las antipartículas del electrón, pero en 1930 ni se los conocía ni nadie había predicho su existencia. A Oppenheimer le faltó poco para hacerlo en su respuesta a Dirac.

1931–1933



ROBERT A. MILLIKAN en 1932, con un espectroscopio registrador que construyó en el sótano de su casa para detectar los rayos cósmicos (*abajo*). Millikan acuñó la expresión "rayo cósmico" en 1925. Durante un experimento de radiación cósmica, Carl Anderson descubrió el positrón en 1932. A la derecha se le ve con Millikan y una fotografía de las trazas que revelaron la partícula. Oppenheimer coincidió con Millikan en el Instituto de Tecnología de California.



1931 1932 1933



ERNEST O. LAWRENCE situado a la izquierda de Oppenheimer. Lawrence inventó el ciclotrón en la universidad de California en Berkeley en 1930. Allí estudiaron ambos la física nuclear.

Aun tras el descubrimiento del positrón por el físico del Caltech Carl Anderson en 1932, la teoría de esa partícula que se seguía de la obra de Dirac estaba plagada de problemas. Oppenheimer y otros físicos que trabajaban en electrodinámica cuántica (QED) tenían muchas dudas acerca de la teoría básica. En 1930, por ejemplo, Oppenheimer mostró que cuando se aplicaba la teoría de la QED que ese mismo año habían publicado Heisenberg y Pauli a las interacciones entre los electrones, los protones y el campo electromagnético, el desplazamiento de las líneas espectrales era infinito. El escepticismo de Oppenheimer sobre la QED se mantuvo vivo a lo largo de esos años por las anomalías que observó trabajando con los rayos cósmicos, causadas por el muon y otras partículas de alta energía que entonces no se conocían.

En 1931 intentó hallar una ecuación del fotón que fuese análoga a la de Dirac para el electrón. Fracasó en su objetivo principal, pero descubrió la diferencia básica existente entre las partículas de espín semientero y las de espín entero, que luego constituiría el fundamento de la prueba formal dada por Pauli de la conexión entre espín y estadística.

La creación y la destrucción de materia

Según la mecánica cuántica, no sólo es posible la aniquilación de materia, sino también su creación, sujetas ambas a las leyes de conservación de la energía y el momento. Un rayo gamma, por ejemplo, puede dar lugar a un electrón y a un positrón en un proceso llamado de producción de pares. La idea de la producción de pares no se le ocurrió a Oppenheimer, pero sí fue él quien proporcionó la primera descripción correcta del fenómeno en 1933, con la ayuda de su alumno Milton S. Plesset. Junto con Wendell H. Furry, otro alumno suyo, desarrolló un año después la teoría del electrón y el positrón en la forma que básicamente se acepta hoy en día. Mostraron que la carga observada del electrón no es la carga verdadera; anticiparon así el fenómeno de la renormalización de la carga, que sirvió para explicar algunas de las dificultades iniciales que rodearon a los infinitos de la QED.

La mayoría de los experimentos de física de altas energías se efectuaban en la atmósfera de la Tierra por esta

época de los años treinta, ya que partículas de gran energía (del orden de los mil millones de voltios) de origen cósmico bombardean los átomos atmosféricos. Anderson descubrió el positrón en 1932 durante un estudio de la radiación cósmica en una cámara de niebla. Si se coloca una placa metálica, digamos de plomo, en una cámara de niebla, una traza de rayo cósmico que incida por su parte superior originará otra serie de trazas que saldrán de determinado punto de su superficie inferior. Oppenheimer y su alumno J. Franklin Carlson mostraron que estos "chaparrones" de rayos cósmicos, compuestos por lo común de fotones, electrones y positrones, son el resultado de una cascada de producciones de pares de electrones y positrones. Se puede, claro está, variar el grosor de la placa de plomo. Si el rayo cósmico primario era un fotón o un electrón, Oppenheimer y Carlson observaron que una placa de plomo de 20 centímetros de grosor absorbía toda la radiación resultante, en el caso de los valores de energía experimentados.

Datos adicionales descubrieron, sin embargo, que la penetración era mayor de lo que cabía esperar de fotones y electrones. Llegaron así a la conclusión de que "hay otro componente de los rayos cósmicos". Pocos meses después, equipos investigadores de Caltech y de Harvard descubrieron simultáneamente una partícula nueva. Oppenheimer y su colega Robert Serber, de Berkeley, la identificaron con la que el físico japonés Hideki Yukawa había predicho para explicar las fuerzas nucleares. Pero la partícula recién descubierta resultó ser el muon. La partícula predicha por Yukawa era el pion, que tardó más tiempo en encontrarse.

Mientras estaba en Berkeley las investigaciones de Oppenheimer se centraban en el acelerador. Cuando James Chadwick descubrió el neutrón en 1932 se abandonó la teoría de que el núcleo constaba de protones y electrones, que fue sustituida por el modelo moderno de protones y neutrones. Durante la primavera de 1933, Lawrence empezó a acelerar deuterones, que están formados por un solo neutrón y un protón, y bombardeó con ellos núcleos pesados. Descubrió que los deuterones desintegraban los núcleos con mayor eficacia que los protones y, muy poco después, que de los núcleos que hacían de blanco se desprendían partículas alfa.

Luego se obtuvo un resultado desconcertante: cuando deuterones de gran energía chocaban contra cualquier tipo de núcleo, el blanco desprendía protones que siempre tenían energías bastante parecidas. La causa del misterio resultó ser la contaminación del aparato de Lawrence por los deuterones, de modo que los protones observados provenían todos de la fusión del deuterio. Antes de que se llegase a tal explicación, sin embargo, se investigó mucho sobre las reacciones implicadas. Oppenheimer y su alumna Melba N. Phillips mostraron que cuando un deuterón chocaba con un núcleo pesado, éste podía capturar el neutrón del deuterón, con lo que el protón quedaba libre. La teoría de esta reacción formulada por ellos explicaba con precisión los extraños resultados de Lawrence.

Las estrellas de neutrones y los agujeros negros

Hoy se acepta que las estrellas de neutrones y los agujeros negros son etapas finales de la evolución estelar; la existencia de unas y de otros se propuso por razones teóricas durante los años treinta. Oppenheimer y dos de sus alumnos, George M. Volkoff y Hartland S. Snyder, estuvieron en la vanguardia de ese avance. Oppenheimer y Volkoff se interesaron por una idea planteada por otro investigador, la de que una estrella de masa lo suficientemente grande y que hubiese agotado su energía nuclear podría formar un núcleo de neutrones. Para comprobar su viabilidad, emprendieron la comparación de dos tratamientos gravitatorios del proceso, uno basado en la teoría de Newton y el otro en la de Einstein.

La ecuación de Oppenheimer-Volkoff, basada en la relatividad general, proporcionaba el gradiente de presión en el interior de una estrella y reveló que la presión crecía con la profundidad más deprisa de lo que resultaba de un cálculo de tipo newtoniano. Ambos físicos realizaron además los primeros cálculos detallados de la estructura de una estrella de neutrones y pusieron así los cimientos de la teoría de la estructura estelar basada en la relatividad general. Justo antes de la publicación del artículo que recogía este trabajo, Oppenheimer escribió una carta a George E. Uhlenbeck, físico teórico de la universidad de Michigan que, con su colega Samuel A. Goudsmit, había descubierto el espín del electrón, en la que le decía: "Hemos ... trabajado en las soluciones estáticas y no estáticas para masas muy pesadas ... puede que las estrellas viejas se derrumben y creen núcleos formados por neutrones. Los resultados son muy raros..."

Y se volvieron todavía más extraños. Ese mismo año Oppenheimer y Snyder publicaron un artículo clásico, titulado "Sobre la contracción gravitatoria continua", en el que indicaban que cuando una estrella de mucha masa agotaba su fuente interna de energía nuclear, su destino final venía determinado por la cantidad de masa que pudiese expulsar, ya fuera por radiación o por desprendimiento debido a una rotación rápida. Una vez agotadas todas las vías de pérdida de masa, sólo queda el núcleo, mantenido por la fuerza gravitatoria, que le haría derrumbarse sobre sí mismo en ausencia de una energía termonuclear que la contrarrestase.

A medida que se produce este colapso, la luz que irradia el núcleo se va desplazando cada vez más hacia el rojo, es decir, su longitud de onda se va alargando; además su vía de escape hacia el espacio es cada vez más angosta, hasta que se cierra sobre sí misma y deja tras de sí una fuente de atracción gravitatoria inobservable desde fuera. Oppenheimer y Snyder proporcionaron así el primer cálculo de cómo podía formarse un agujero negro.

Los púlsares, de los que hoy se sabe que son estrellas de neutrones en rotación, se vieron por primera vez en 1967, el año en que Oppenheimer murió de cáncer en Princeton. Si hubiese vivido más, podría haber disfrutado del reconocimiento que ese descubrimiento aportó a su física de preguerra, que había quedado ensombrecida por la tarea que realizó durante el periodo bélico y por su fama de posguerra.

JOHN S. RIGDEN recibió el doctorado en la universidad Johns Hopkins en 1960. Ahora es director de los programas de física del Instituto Americano de Física.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THREE TRIBUTES TO J. ROBERT OPPENHEIMER. Hans A. Bethe. Institute for Advanced Study, Princeton, N. J., 1967.

J. ROBERT OPPENHEIMER, 1904-1967. Hans A. Bethe en *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, vol. 14, páginas 391-416; 1968.

OPPENHEIMER. I. I. Rabi, Robert Serber, Victor F. Weisskopf, Abraham Pais y Glenn T. Seaborg. Charles Scribner's Sons, 1969.

THE OPPENHEIMER CASE: SECURITY ON TRIAL. Philip M. Stern. Hart-Davis, 1971.

J. ROBERT OPPENHEIMER: LETTERS AND RECOLLECTIONS. A. Kimball Smith y C. Weiner. Harvard University Press, 1980.

Las cuevas paleolíticas de Francia

La cueva de Chauvet, recién descubierta, es un yacimiento clave del arte paleolítico. Durante 25.000 años los habitantes de Europa expresaron su cultura pintando y grabando en las paredes de las cuevas

Jean Clottes

El 24 de diciembre de 1994, tres espeleólogos volvieron a una cueva próxima a Vallon-Pont-D'Arc, en la región francesa del Ardèche, donde algunos días antes habían encontrado un estrecho pasadizo al fondo de una pequeña galería. Descendieron y fueron a dar a una red de pasadizos subterráneos de varios centenares de metros. A la luz de sus lámparas descubrieron paredes cubiertas de pinturas y de grabados de animales: caballos, rinocerontes, leones, bisontes, uros, osos, mamuts, cabras; incluso llegaron a distinguir una pantera y, tal vez, una hiena. Este arca de Noé está repleta de signos simbólicos, de paneles con puntuaciones y con manos en positivo o en negativo. La cueva de Chauvet, que lleva el nombre de uno de sus descubridores, es el equivalente artístico de las cuevas de Lascaux, en la Dordoña, y de Altamira en España. La comarca francesa del Ardèche se convierte así en un emplazamiento clave del arte prehistórico.

En los últimos diez años se han descubierto en Francia veintidós nuevas cuevas con arte parietal paleolítico; en total pueden contarse hasta ciento cincuenta cuevas decoradas en este país. El último descubrimiento importante, el de la cueva de Cosquer, se hizo en julio de 1991. Está situada al pie de un acantilado, a 37 metros bajo el nivel del mar, a pocos kilómetros de Marsella. Los grabados y las pinturas que contiene se conservaron porque la galería de acceso formaba una rampa ascendente, protegiéndolas, aunque la mitad de la sala principal está bajo el nivel del mar. Hace 20.000 años, en el momento del máximo glacial, el nivel del mar estaba entre ciento diez y ciento veinte metros más bajo que en la actualidad y la orilla se encontraba a varios kilómetros de donde está hoy.

El desarrollo de la espeleología y de las investigaciones sistemáticas ha permitido el descubrimiento de numerosos yacimientos paleolíticos, a los que actualmente se accede con gran dificultad. Pero sólo conocemos una ínfima parte de las cuevas decoradas, ya que tan frágiles obras han resultado muchas veces destruidas. Las que han llegado hasta nosotros, junto a los objetos de arte mueble, son el testimonio de la cultura de los primeros hombres modernos.

En Europa el arte de las cuevas se desarrolló durante el Paleolítico, a lo largo de unos 25.000 años. En la segunda mitad del siglo XIX, curiosos y eruditos empezaron a dar a conocer las pinturas y los grabados que veían en las cuevas; con métodos rudimentarios hicieron los primeros calcos, que llevaron, a principios del siglo XX, al reconocimiento oficial de un arte parietal paleolítico. El estudio de las obras de arte y las comparaciones entre yacimientos nos han dado pistas acerca de la cultura y la psicología de los hombres que las crearon. Hoy en día las teorías sobre el análisis de las obras de arte hacen que las interpretaciones de su significado sean más objetivas y más prudentes.



1. EN LAS PAREDES de la cueva de Chauvet tenemos caballos, rinocerontes y uros pintados en negro y rojo; el yacimiento se descubrió en diciembre de 1994 cerca de Vallon-Pont-d'Arc, en la comarca francesa del Ardèche.

El espíritu de las formas

La interpretación de las pinturas sigue siendo delicada; las teorías más atractivas no siempre son verificables. Hace tres años, en la entrada de una cueva decorada de la California occidental, observé tres trazos verticales pintados en rojo. Hace setenta años, el abate Breuil hubiese visto en ellos tres flechas, pintadas por un grupo de cazadores para que la caza fuera productiva. Hace treinta, André Leroi-Gourhan, que desarrolló una teoría sobre el simbolismo sexual del arte paleolítico, hubiese atribuido a esos trazos verticales, situados cerca de la entrada, un valor masculino, por oposición a la cueva, que es una cavidad, y por lo tanto femenina. Estas dos interpretaciones no son incompatibles: en general, los hombres son los que cazan. Mi guía, un indígena que perpetuaba la tradición espiritual del lugar, transmitida en su familia generación tras generación, me explicó su significado: los rasgos indicaban que no podían entrar en la cueva más que quienes hubiesen pasado el segundo nivel de iniciación de la tribu. Sin esta explicación ¿cómo hubiésemos podido adivinarlo?

Gracias al progreso de los métodos analíticos, podemos datar los yacimientos con mucha más seguridad, al tiempo que descu-

brimos las técnicas que la humanidad había ideado para pintar y dibujar. Podemos incluso determinar cómo evolucionaron, y por qué rutas, tanto las técnicas como las representaciones a las que se aplicaban hace 20.000 años.

La importancia y la originalidad de la cueva de Chauvet derivan de la variedad y la naturaleza de los animales allí representados: muchos de ellos son carnívoros y sorprenden los primeros grabados y pinturas conocidos de un búho, de una pantera y quizá de una hiena.

Cada yacimiento importante tiene representaciones originales, por no decir exclusivas. Así el único dibujo conocido de una comadreja está hecho con un carbón en el Réseau Clastres, en la región francesa de Ariège. En la cueva de Cosquer los animales marinos flanquean a la fauna terrestre: ocho focas grabadas y tres pingüinos pintados en negro. Son las únicas imágenes indiscutibles de grandes pingüinos en el arte prehistórico. Esta especie, como muchas otras que vivían en Europa durante el Paleolítico, ha desaparecido por culpa del hombre. Marineros y pescadores la perjudicaron hasta extinguirla a mediados del siglo XIX.

El entorno de los yacimientos explica en parte estas particularidades. La cueva Cosquer estaba a pocos kilómetros de la costa, donde durante el Solutrense, en tiempos de la última glaciación, hace 20.000 años, vivían pingüinos y focas. No es extraño, pues, que los pintores los representaran. Pero los artistas del Paleolítico no trataban de conseguir una descripción exacta de la fauna: escogían sus temas por razones culturales, rituales o religiosas, que variaban según los grupos. Los animales menos representados no siempre eran escasos en los alrededores: el reno se consumió durante el Paleolítico tanto como el caballo o el bisonte, según demuestran los restos alimentarios, a pesar de lo cual aparece mucho menos que ellos. Ningún argumento naturalista puede explicar que ciento cincuenta mamuts decoren las paredes de la cueva de Rouffignac, en la Dordoña, ni que el número de rinocerontes que se encuentran en la cueva de Chauvet sea superior en más del doble al total de estos animales que podemos encontrar sumando los de todas las cuevas europeas juntas.

JEAN CLOTTES es conservador general del patrimonio del Ministerio de Cultura francés. Este artículo es transcripción de una entrevista.

Un arte mundial

No obstante, las manifestaciones del arte del Paleolítico tienen elementos comunes. Las representaciones figurativas sólo se refieren a animales, predominantemente mamíferos: suelen ser caballos, bisontes, cabras, ciervos, renos y mamuts. No hay adornos, como lo serían líneas que representasen el suelo, o elementos astronómicos como el Sol, la Luna o las estrellas. Tampoco se refleja la vegetación, ni el mar, los ríos o las montañas. Son muy escasas las representaciones humanas, de las que no se ha encontrado aún ninguna en la cueva de Chauvet.

El arte parietal existe sobre toda la faz de la Tierra. Encontramos abrigos o rocas decoradas en Australia, en Namibia, en Brasil, en Escandinavia, en Siberia y en China. Estudiarlo allí donde aún se practica de modo habitual, sobre todo en Austra-



2. LAS PINTURAS de la cueva de Chauvet contienen gran número de rinocerontes, animal poco frecuente en las representaciones paleolíticas. Este sector de un gran panel tiene también un reno, leones y puntuaciones en rojo.



3. EN ESTE MAPA DE FRANCIA se muestra la localización de una docena de cuevas ornamentadas con grabados y pinturas, indicándose también la edad más probable de sus figuras. En Francia hay contabilizadas 150 cuevas de arte paleolítico; las concentraciones más importantes se dan en las regiones de Ariège, Dordoña, Lot y Ardèche.

lia, puede aclararnos algunas de las posibles motivaciones de los artistas prehistóricos. En los casos de los aborígenes australianos, de los indios de América y de los bosquimanos de Africa del Sur, el arte rupestre tiene objetivos religiosos o mágicos; el artista comunica mitos y leyendas. El arte prehistórico estaba asociado probablemente a ritos: el hecho de penetrar en cuevas profundas, donde no entra la luz del exterior, va contra los miedos instintivos del hombre y es como ir al mundo sombrío de la muerte, donde reinan los espíritus.

No obstante, debemos desconfiar de las interpretaciones que parecen demasiado claras. La evolución de las técnicas de investigación lo ha demostrado en la cueva de Montespan, en el Alto Garona. Norbert Casteret había descubierto en ella hacia 1920 la estatua de un oso de arcilla, que tenía entre las patas un cráneo de osezno. El oso acéfalo de Montespan sirvió de apoyo a la teoría de la magia de la caza; incluso se echó mano de ceremonias de hechizamiento. Sin embargo, Michel García, del CNRS, ha demostrado hace poco que la galería que hasta ahora se creía inviolada desde el Magdaleniense, hace más de 12.000 años, había sido visitada hace unos 5000 años, durante el Calcolítico, por hombres que extrajeron arcilla, proceso en el que pudieron haber hecho desaparecer la cabeza de la estatua del oso. Además se encontraron en la galería esqueletos de osos de las cavernas, entre los que había el de un osezno. Estos descubrimientos desmitifican una bonita historia en beneficio de una realidad más prosaica.

El hombre asesinado

La observación objetiva del arte parietal nos deja entrever la psicología de sus autores. Una de las figuras más importantes de la cueva de Cosquer, que estudié con Jean Courtin, del CNRS de Marsella, es "el hombre asesinado"; se trata de una figura humana, tendida boca arriba, con los miembros levantados hacia el cielo, atravesada de parte a parte por un enorme trazo, emplumado en ambos extremos (*véase la figura 5, arriba*).

Observaciones hechas en diciembre pasado demuestran el carácter humano de esta figura: una mano, cuyos dedos se hicieron raspando sobre la pared, se encuentra en el extremo del brazo. "El hombre asesinado" lo fue por otros hombres, que lo atravesaron. Este grabado revela que los artistas de hace 19.000 años representaron el asesinato y el sacrificio humano. En la cueva de Lascaux, en la Dordoña, hay otro dibujo que representa también una muerte humana: un hombre cae boca abajo delante de un bisonte que carga contra él, con la cabeza baja (*véase la figura 5, abajo*). Estas dos representaciones ilustran sin duda dos conceptos, pero no podemos decir mucho más sobre su significado: ¿hechizo, magia cinegética o narración de mitos?

Antes del descubrimiento del "hombre asesinado" de la cueva de Cosquer pensábamos que este tema era propio de la región francesa del Lot. Las cuevas de Pech-Merle y de Cougnac, que se encuentran sólo a cincuenta kilómetros la una de la otra, tienen representaciones análogas. El grabado de la cueva de Cosquer, que podemos considerar contemporáneo si aceptamos un margen de error de unos dos mil años, está a más de 300 kilómetros hacia el este. El tema de la representación de la muerte se difundió, por lo tanto, con bastante rapidez.

¿Cómo conocían los artistas los temas de los demás, cómo los intercambiaban? Los datos arqueológicos prueban que había circulación de objetos. En la cueva de Mas d'Azil, en un estrato magdaleniense, se encontró un diente de cachalote esculpido, a más de doscientos kilómetros del mar. En la misma región se encuentran conchas marinas, agujereadas para convertirlas en colgantes, que proceden del Mediterráneo y del Atlántico, y también objetos de sílex provenientes de la Dordoña. Sin duda los temas artísticos y religiosos viajaban de la misma manera.

En Lascaux, en la comarca del Lot, en el área pirenaica y en dos cuevas españolas tenemos documentados los claviformes, unos signos constituidos por una barra vertical, cuya longitud varía entre los veinte y los cuarenta centímetros, y por un pequeño abultamiento en uno de los lados del trazo. El mismo motivo, cinco o seis claviformes uno al lado del otro y agrupados de forma similar, aparece en la cueva de Fontanet, en la región de Ariège, y a quinientos kilómetros de allí, en la cueva española de El Pindal, en Asturias.

La cueva de Le Placard, en la Charente, tiene una docena de figu-

ras geométricas estandarizadas, formadas por una gruesa barra transversal sobre la que se sitúa, en su parte central, una especie de chimenea y que se prolonga hacia abajo, en cada uno de los extremos, por medio de una excrecencia oblicua. Ignoramos su significado y su papel exactos, pero estos mismos signos se encuentran en las cuevas de Cougnac y de Pech-Merle, a ciento cincuenta kilómetros de Le Placard. La fiabilidad de la datación de los signos de esta última (más de 20.000 años) nos permite asignar una fecha contemporánea al menos a una parte de las figuras conocidas en las otras dos cavidades. Este paralelismo nos confirma los contactos entre grupos que estaban separados por el Périgord, donde todavía no se han encontrado.

Por todo lo expuesto, la datación de las obras de arte es indispensable para la interpretación de los temas y para el estudio de las evoluciones culturales. El análisis de las superposiciones de figuras, el del contexto arqueológico (niveles de hábitat cerca de las paredes, arte mueble) y las comparaciones estilísticas con el arte de cuevas bien datadas se conjugan actualmente con el método del carbono-14 para llegar a respuestas más precisas.

La datación

La primera datación que se hace de un yacimiento se basa siempre en comparaciones estilísticas. Las pinturas de la cueva de Chauvet datan de hace unos dieciocho a veinte mil años, como los dibujos figurativos de la cueva de Cosquer. La perspectiva que se utiliza es similar: los cuerpos de los bisontes están de perfil, pero en cambio su cornamenta presenta un giro de noventa grados y la vemos de cara. Este tipo de estimaciones debe tomarse con precaución, pues no sabemos bien durante cuánto tiempo se utilizó un estilo como éste, ni tampoco la velocidad con que pudo transmitirse a tan largas distancias.

En la cueva de Cosquer el estudio de la superposición de las figuras ha permitido establecer dos períodos de utilización. Quienes la ocuparon cubrieron la totalidad de las paredes y de las bóvedas con trazos digitales. En los lugares donde la superficie de la pared era más suave, dejaron correr sus manos por ella, lo que produjo meandros y una gran cantidad de trazos paralelos, sin que pueda distinguirse ningún tipo de figuras. Hicieron cincuenta y cinco manos en negativo, muchas con los dedos incompletos, gracias a la técnica del soplado (*véase la figura 6*). A estas manos y trazos digitales suelen superponerse animales, pintados o grabados, signos geométricos, rectángulos, zigzags, y signos de azagayas sobre los animales. Puesto que nunca se da la superposición inversa, hemos deducido que las manos y los trazos digitales son anteriores a los dibujos de animales.

Hoy en día medio miligramo de carbono basta para obtener una fecha por el método del carbono 14. Esto ha significado un gran avance: ahora estamos datando las obras de arte mismas y, en cierta medida, hasta podemos escoger las que queremos. Sin embargo, sólo podemos fechar así los dibujos hechos con carbón vegetal y medio miligramo de carbono puro representa, a veces, mucha pintura. Además los datos obtenidos son sólo evaluaciones estadísticas: la probabilidad de que la fecha real se sitúe, con un margen de error de más o menos un diez por ciento, alrededor de una fecha media es del 67 por ciento. Para tener un 95 por





4. LA REPRESENTACION DE CIERTOS TIPOS específicos de animales caracterizan a los yacimientos más importantes. En la cueva de Chauvet puede observarse una pantera de las nieves al lado de lo que podría ser una hiena (*arriba*). En la cueva de Cosquer, cerca de Marsella, encontramos las únicas representaciones de pingüinos conocidas (*abajo*).









5. LAS REPRESENTACIONES DE SERES HUMANOS son raras en el arte paleolítico rupestre. El grabado del "hombre asesinado" de la cueva de Cosquer (*arriba*) se parece a los de las cuevas de Cougnac (*en medio, a la izquierda*) y de Pech-Merle (*en medio, a la derecha*). La representación de la muerte de un hombre a manos de otros se hallaba ya bastante difundida hace unos 20.000 años. La "escena del pozo" de la cueva de Lascaux (*abajo*) nos muestra lo que podría haber sido un accidente de caza. El calco del grabado de la cueva de Pech-Merle revela también un signo que encontramos en la cueva de Le Placard.

ciento de certeza hace falta doblar el intervalo de incertidumbre de la fecha, y triplicarla para llegar al 99 por ciento. Además lo que se fecha es el carbón que sirvió para realizar la pintura y no el gesto del dibujante. Si usó carbón fósil, o trozos dejados 10.000 años antes por sus predecesores, la fecha no tiene ningún sentido. Para fechar un yacimiento con precisión es imprescindible multiplicar las dataciones.

Si seguimos este razonamiento, la cueva de Cosquer se está convirtiendo en la mejor datada del mundo: disponemos ya de doce fechas y, tras los trabajos de J. Courtin el otoño pasado, hay todavía otra serie en ejecución. La pared, blanda, y algunas fisuras retuvieron en algunos lugares trozos de carbón, por lo que fue relativamente fácil tomar muestras en cantidad suficiente sin perjudicar las pinturas. Siete fechas proceden directamente de pinturas parietales y cinco de carbones recogidos del suelo. Una mano en negativo ha sido fechada en unos 27.100 años gracias a dos muestras; otros dos carbones han dado fechas parecidas. En cuanto a las figuras naturalistas, una cabeza de felino tiene 19.200 años, un caballo, 18.000, y un bisonte, entre 18.000 y 18.500 años. Un par de muestras de carbón han arrojado también fechas que concuerdan con esta fase de utilización de la cueva. Se confirma así que hubo dos etapas de uso de la cueva, separadas entre sí por un intervalo de 8000 años.

Utilizaciones repetidas

La cueva de Cougnac fue estudiada por Michel Lorblanchet, del CNRS; en dicho yacimiento el dibujo de una hembra de megaceros, una especie extinguida de gran ciervo, dio dos fechas separadas por un gran intervalo: 25.120 y 19.498 años. Las fechas tomadas de un megaceros macho son más coherentes: 22.750 y 23.616 años. Por otra parte, una marca digital ha arrojado 14.300 años y otra, en otro panel, 13.810 años. Estas fechas nos aseguran que el santuario se utilizó en distintas ocasiones durante, al menos, diez milenios; también demostrarían que los megaceros fueron dibujados durante el Perigordiense (el macho y la hembra quizá no sean de la misma época) y que las puntuaciones digitales se hicieron durante el Magdaleniense medio. La fecha de 15.000 años obtenida de un metacarpo de reno que estaba incrustado en la calcita del suelo de la cueva no hace más que confirmar que hubo una frecuentación más o

menos continuada de la cavidad. El contexto arqueológico corrobora aquí las fechas parietales directas.

La existencia de un contexto arqueológico permite fechar las figuras indirectamente. Si los artistas vivieron durante cierto tiempo en la cueva y comieron y dejaron sus útiles en ella, podemos datar estos restos. No obstante, cuando el suelo es duro o está cubierto de calcita, como el de la cueva de Cosquer, no queda nada. La dificultad de las dataciones indirectas reside en establecer relaciones entre los niveles arqueológicos y las paredes ornamentadas. En Arcy-sur-Cure, en la comarca francesa de Yonne, se ha obtenido la fecha de unos carbones como de unos 28.000 años y la de unos huesos quemados, entre 24.500 y 27.000 años. Dominique Baffier, del laboratorio de etnología prehistórica, y Michel Girard, del centro de investigaciones arqueológicas, ambos del CNRS francés, se mantienen prudentes en cuanto a una correlación entre estas fechas y las que se atribuyen a las pinturas parietales: es muy posible que el suelo sufriese alteraciones y que los niveles arqueológicos se mezclasen.





6. ESTAS MANOS EN NEGATIVO, con los dedos incompletos, se pintaron con la técnica del soplado: se ponía la mano sobre la pared, con algunos dedos doblados, mientras el artista soplaba la pintura. Las manos de las cuevas de Cosquer (*a la izquierda*) y de Gargas (*a la derecha*) serían contemporáneas, de hace unos 27.000 años.

En el abrigo de Colombier, de Vallon-Pont-d'Arc, los prehistoriadores han tenido más suerte: un trozo de la pared, con un magnífico grabado de una cabra, de factura análoga a los que aún se conservan *in situ*, se desprendió y cayó al suelo; durante la excavación del yacimiento pudo fijarse con exactitud su posición en uno de los niveles arqueológicos, que las fechas obtenidas por carbono 14 situaron entre hace 13.000 y 14.000 años. Este descubrimiento hace retroceder bastante la fecha del conjunto de Colombier, atribuido hasta ahora al Magdaleniense final, hace poco más de 12.000 años.

En la cueva de Gargas, en los Pirineos, una esquirla ósea fijada en una fisura de la pared, muy cerca de unas manos en negativo, ha sido fechada en unos 27.000 años. Esta fecha y la que se obtuvo para la mano en negativo de la cueva de Cosquer se apoyan mutuamente, refiriéndose a un mismo motivo, por otro lado bastante inusual: en ambos casos tenemos manos en negativo con los dedos incompletos (*véase la figura 6*). Estas fechas son las más antiguas conocidas para este tipo de representaciones.

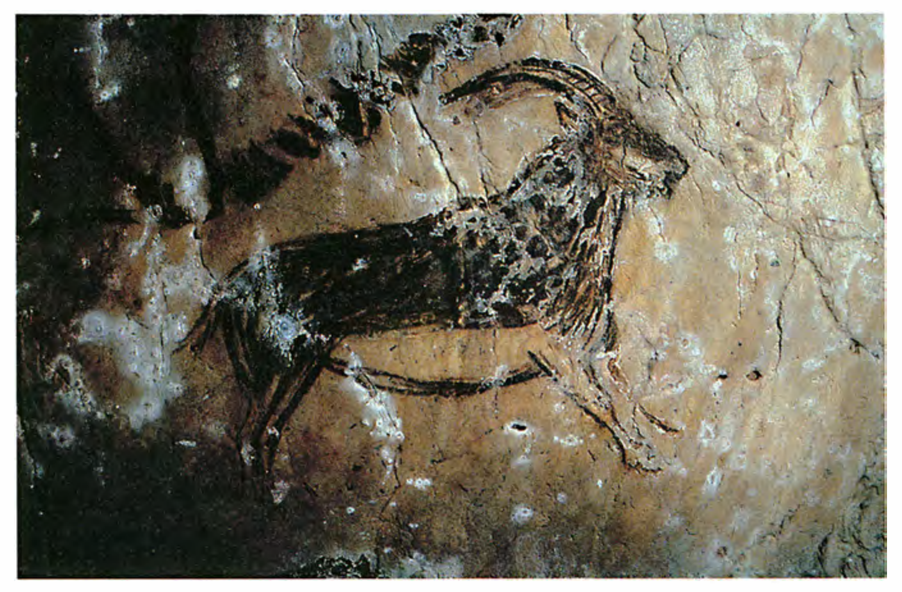
No sabemos si las manos de Gargas se pintaron a lo largo de los milenios o lo fueron durante un lapso corto de tiempo, hace 27.000 años. Entre estas figuras tenemos dos series de pulgares en negativo, negros e idénticos, que replantearían el problema de una serie de siete pulgares rojos y en negativo que se encuentran en la cueva de Pech-Merle. Este motivo es demasiado original para que reaparezca por casualidad con miles de años de diferencia. Esto haría retroceder las fechas de las representaciones más antiguas de Pech-Merle en unos 7000 años respecto a las admitidas hasta ahora.

Los análisis físicos y químicos también nos informan de las técnicas artísticas de los hombres del paleolítico, sobre todo acerca de la preparación de los colores. El abate Breuil realizó los primeros estudios, y el químico Henri Moissan los primeros análisis, a principios de siglo, pero ahora podemos afinar mucho más.

Pinturas y pigmentos

En el Salón negro de la cueva de Niaux, Phillippe Walter y Michel Menu, del Laboratorio de investigación de los museos de Francia, pudieron comprobar que, a menudo, un esbozo preliminar al carbón precedía a la aplicación de la pintura: la composición final estaba muy pensada y preparada. Estos esbozos tan sólo existen en las pinturas más tardías, atribuidas al Magdaleniense final, hace entre 12.000 y 13.000 años. En cambio, en las galerías más profundas no se ha encontrado ningún esbozo preliminar: los artistas no estuvieron allí mucho tiempo. Cuando pintaron, lo hicieron de la forma más rápida posible, dibujando directamente los animales, al contrario que en el Salón negro, donde se demoraron.

Una toma sistemática de muestras en la cueva de Niaux ha servido para conocer la composición de la pintura. Se utilizaron diversos pigmentos, como la hematita para los rojos y el carbón o un óxido de manganeso para el negro. Además del pigmento y del aglutinante, los pintores incorporaban otro más: los mezclaban con un mineral molido, en unas determinadas proporciones que no modificaban los colores resultantes, y así economizaban pigmento. Además la mezcla era más homogénea y se adhería mejor a las paredes, lo que aumentaba las posibilidades de conservación de los frescos. Dos minerales fueron utilizados sucesivamente como tercer elemento o "carga": el feldespato potásico y la biotita. Los análisis realizados sobre objetos pintados, datados por su contexto arqueológico, nos demuestran que el feldespato se utilizó durante el Magdaleniense medio, hace unos 14.000 años, en las cavernas de Enlène y de Mas d'Azil, mientras que la biotita entra en la composición de las pinturas del Magdaleniense final de la cueva de la Vache, a pocos centenares de metros de la cueva de Niaux. No obstante, el escaso número de objetos analizados, una veintena aproximadamente, nos incita a ser prudentes y a reconocer que no disponemos de plazos precisos de utilización de estas recetas.





7. LAS MISMAS RECETAS DE PINTURA se utilizaron en las cuevas de la región del Ariège y en las de Réseau Clastres y de Niaux, prácticamente vecinas. Las representaciones del Salón negro de Niaux, como la cabra reproducida arriba, tienen muchos más detalles y están más elaboradas que las del Réseau Clastres (*abajo*), por lo que cabe deducir que los artistas tardaron más tiempo en pintarlas.

En las cuevas de Pech-Merle, de Marcenac y de Cougnac, situadas todas en la comarca del Lot, M. Lorblanchet realizó diversos análisis de pigmentos. Los megaceros negros de Cougnac fueron trazados al carboncillo de pino o de enebro, mientras que el caballo de Marcenac se dibujó con un lápiz de dióxido de manganeso. Volviendo a Cougnac, varias figuras fueron hechas con un único pigmento rojo, lo que da fuerza a la idea de una ejecución simultánea, de una verdadera composición del friso, y no de una acumulación de dibujos a lo largo del tiempo. Por el contrario, unos pequeños motivos laterales se dibujaron con un ocre diferente. Estas observaciones nos han permitido precisar las fases de realización del friso. Los pigmentos utilizados eran naturales y de origen local, sin mezclas.

En diferentes cuevas de la región del Ariège se analizaron, por primera vez en Europa, los aglutinantes. En Réseau Clastres, los análisis fueron completamente negativos: el aglutinante era simplemente agua. El empleo de este líquido, disponible allí mismo, concordaría ciertamente con el carácter rápido y menos elaborado de las pinturas que se encuentran en las galerías profundas, donde los hombres no se demoraron mucho tiempo.

En cambio, en Fontanet, en Enlène y en Trois Frères se descubrieron elementos orgánicos. En los dos últimos casos se utilizó el mismo aglutinante, de origen vegetal, mientras que el de Fontanet sería más bien de origen animal. Así pues, los magdalenienses habrían utilizado una verdadera pintura al óleo.

Los yacimientos que ahora conocemos, y los que descubriremos en el futuro, no serán más que una ínfima parte de las cuevas en las que nuestros antepasados pintaron y grabaron. Progresaremos en el conocimiento de este arte, pero nunca llegaremos a tener una visión completa de las culturas que evolucionaron durante más de 25.000 años en Europa. Por lo tanto nuestro principal objetivo ha de ser conservar los yacimientos: dentro de cincuenta o de cien años podrá obtenerse nueva información gracias a enfoques, modelos explicativos y técnicas diferentes. Es necesario que las generaciones venideras puedan disponer de las cuevas en el mejor estado posible: no sabemos si volverán a producirse descubrimientos tan excepcionales como los de las cuevas de Cosquer o de Chauvet.

Por todo ello, estas cuevas nunca se abrirán al público e incluso los mismos prehistoriadores tendrán restringido el acceso. La cueva de Cosquer estará cerrada al menos durante los dos próximos años, el tiempo necesario para que se realicen estudios de temperatura y de humedad del interior, previos a la continuación de las investigaciones. La cueva de Chauvet se estudiará con técnicas no destructivas y no será excavada de inmediato. Sus secretos nos aguardan desde hace más de quince mil años y no sufrirán por hacerlo algunos más.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

L'ART DES CAVERNES: ATLAS DES GROTTES ORNÉES PALÉOLITHIQUES FRANÇAISES. Ministère de la Culture, Imprimerie Nationale, París, 1985.

ORÍGENES DEL HOMBRE MODERNO, Libros de Investigación y Ciencia, Prensa Científica, Barcelona, 1993.

GROUPE DE RÉFLEXION SUR L'ART PARIÉTAL PALÉOLITHIQUE, *L'ART PARIÉTAL PALÉOLITHIQUE*. Comité des Travaux Historiques et Scientifiques, París, 1993.

LES PREMIERS HOMMES. Dirigido por Göran Burenhult, Bordas, París, 1994.

LA GROTTE COSQUER, PEINTURES ET GRAVURES DE LA CAVERNE ENGLOUTIE. Jean Clottes y Jean Courtin. Editions du Seuil, París, 1994.

LES CAVERNES DE NIAUX, ART MAGDALÉNIEN DE L'ARIÈGE. Jean Clottes. Editions du Seuil, París, 1995.

PRÉHISTOIRE DE L'ART OCCIDENTAL. André Leroi-Gourhan. Editions Mazenod, París, 1995.

Los diagramas de Lyapunov

Todo comenzó tratando de comprender el comportamiento de la levadura de cerveza. Y acabó en unos gráficos apreciados tanto en los círculos científicos como en los artísticos

Mario Markus



1. LAS ILUSTRACIONES de este artículo son diagramas de Lyapunov. El texto al pie de cada una de ellas indica de forma resumida diversas circunstancias de su elaboración, a saber, la función utilizada en la iteración, la secuencia r, el valor inicial x_0, otros parámetros adicionales y las coordenadas de la zona explorada del plano (A,B). También se indica el nombre de quienes las realizaron, abreviándose el del autor del artículo con M. M. La formulación detallada de las distintas funciones iteradas, los nombres utilizados para las variables y las líneas generales de desarrollo del algoritmo se contienen en un recuadro posterior. De acuerdo con esto, los datos de esta primera figura son: función II; secuencia $A^{10}B^{10}$; $x_0 = 0$; $b = 1{,}7$; AI = 0,293 2,909; DI = 0,334 2,868; DD = 0,402 2,936. M. M. y Andreas Gasper.

Trabajaba hasta las cuatro o las cinco de la madrugada. A veces llegaba a dar clases después de no haber dormido en toda la noche... Sólo salía una o dos veces al año, cuando su hermano Sergei, el compositor, daba un concierto... Parecía que mirase sin ver, que escuchase sin oír... Podría decirse que tras él se ocultaba la pureza de un espíritu infantil.

Así describía al matemático Alexander Mijailovich Lyapunov (1857-1918) su alumno Vladimir Andreyevich Steklov, que le acompañó durante treinta años. Lyapunov trabajó desde 1902 hasta su muerte en la Academia de Ciencias de San Petersburgo. Debió de ser leal y excéntrico, solitario y amable. Se suicidó tres días después de la muerte de su esposa, que era prima suya.

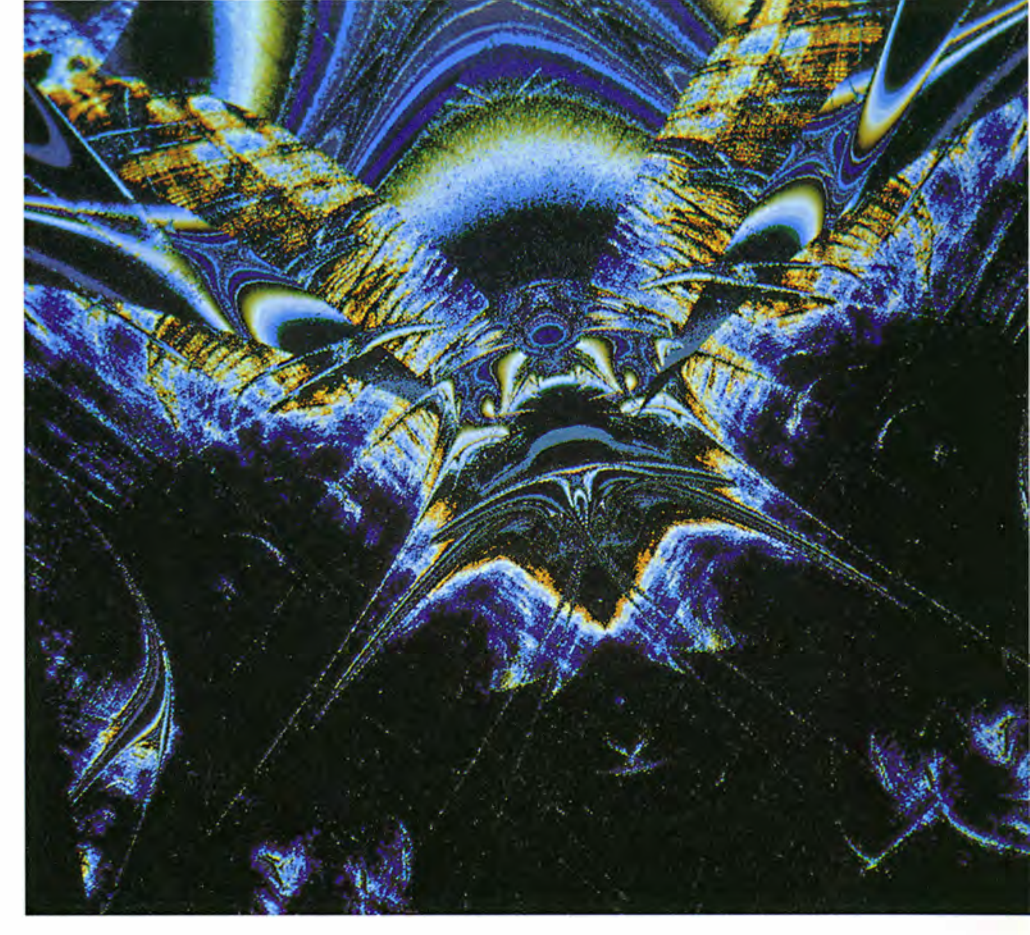
Su epitafio dice: "Fundador de la teoría de la estabilidad del movimiento". Cuando en 1992 se cumplieron los cien años de su oposición a cátedra sobre este tema, se reeditó en honor suyo la versión inglesa de su influyente tesis y el "International Journal of Control" le dedicó un número especial. El concepto de exponente de Lyapunov se ha convertido en fundamental para la teoría de los sistemas dinámicos, que posteriormente a él ha tenido gran desarrollo.

Hace ocho años que yo trabajo sobre toda clase de variaciones del exponente de Lyapunov. ¿Qué es y para qué sirve? A grandes rasgos, describe la rapidez con la que aumenta o disminuye una perturbación en un sistema dinámico. Esto hace que sirva también para señalar la diferencia entre el orden y el caos.

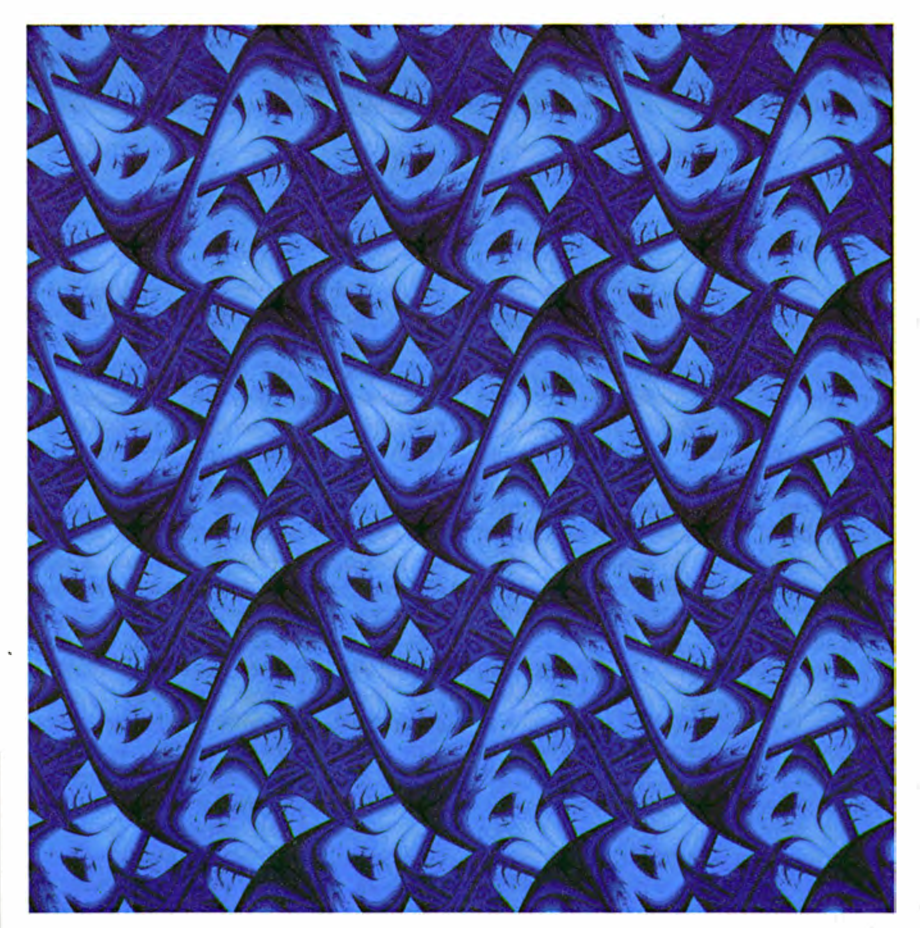
El sistema dinámico que inicialmente me interesaba produce algo tan corriente como la cerveza. La actividad de las células de la levadura (o, más exactamente, de sus enzimas, que transforman la glucosa en alcohol) es tan compleja y tan mal conocida, que me resultó muy difícil simularla con el ordenador.

Las células de la levadura no trabajan de manera constante; su actividad oscila con períodos que van desde unos segundos hasta algunos

MARIO MARKUS nació en Santiago de Chile, donde vivió sus primeros veinte años. Se doctoró en física en Heidelberg. En estos momentos dirige un grupo de trabajo dedicado a las turbulencias químicas y a los autómatas celulares en el Max-Planck-Institut en Dortmund, Alemania.



2. FUNCION VI; secuencia A^2B^2; $x_0 = 0{,}3$; $b = 1{,}6$ $\beta = 2{,}8$; AI = 3 3,38; DI = 2,82 3; DD = 3 2,62. M. M. y Thomas Dütemeyer.



3. FUNCION II; secuencia AB; $x_0 = 0$; $b = 2{,}5$; AI = 0,4 10; AD = 10 10; DD = 10 0,0. M. M. y Martin Allin.





4. FUNCION I; secuencia B^7A^2 B^9 $(BA)^9$ A^7 B^2 A^7; x_0 = 0,8315; AI = 3,769 1,197; AD = 3,8175 1,197; DD = 3,8175 1,155. M. M. y Benno Hess.

5. FUNCION VI; secuencia A^3B^3; x_0 = 0; b = 2,3 β = 0,2; AI = 1,51 1,86; DI = 1,29 1,64; DD = 1,64 1,29. M. M. y Andreas Gasper.

minutos. Tienen por tanto un reloj interno, un biorritmo. A mí me interesaba saber qué ocurriría si se les aportase el alimento en períodos también variables, coincidentes con los suyos o distintos. ¿Se adaptan a las perturbaciones periódicas de su ambiente, persisten en su ritmo o reaccionan de cualquier otra forma? Para saberlo, hicimos el experimento de aportarle a la levadura una solución de azúcar mediante un tubito a una velocidad que oscilaba periódicamente.

La pregunta puede compararse con la siguiente: ¿qué le sucedería a nuestro ritmo de sueño si estuviésemos en un planeta cuyo día fuera de 32 horas, o de 13, en vez de 24? (Véase "Osciladores acoplados y sincronización biológica", por Steven H. Strogatz y Ian Stewart, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1994.)

En determinadas condiciones, la levadura reaccionó adaptándose. En otras, la oscilación propia y la externa se sumaron, lo que produjo cuasiperiodicidad. En unas terceras, en fin, se produjo el caos.

Se lo comenté a Jaime Rössler, de la universidad de Chile, mientras comíamos en una cantina de Santiago. Jaime es un físico que trabaja todas las noches hasta las cuatro o las cinco de la madrugada; incluso llega a dar clases sin haber dormido nada y no puedo quitarme de encima la idea de que no se trate de un Lyapunov redivivo. Jaime me dijo: "No sé por qué les das tantas vueltas a esas ecuaciones de la levadura, cuando hay fórmulas más sencillas que se comportan de modo parecido; toma por ejemplo la ecuación logística $x_{n+1} = rx_n(1 - x_n)$, varía periódicamente el parámetro r y mira a ver qué pasa." Efectivamente, la ecuación logística tiene su propio ritmo, como la levadura, para determinados valores de r y la modificación periódica de r corresponde al aporte periódico de azúcar.

Una idea disparatada sobre la fermentación alcohólica

A primera vista la sugerencia de que el comportamiento de la levadura siga la ecuación logística parece un tanto desacertada, pues presupone que lo que importa es el estado de la levadura en determinados momentos discretos (separados entre sí), sin que suceda entre ellos nada reseñable. Un modelo de este tipo parece más apropiado para los animales, como puedan ser ciertos escarabajos, que nacen una vez al año, condicionan el número de sus descendientes mediante la puesta de huevos y la cantidad de alimento devorada, y luego mueren.

Al principio hay x_0 individuos. El número de individuos x_{n+1} de la generación $n + 1$ es proporcional al número x_n de la generación precedente, n, y al alimento que han dejado disponible, el cual, a su vez, es proporcional a $1 - x_n$. De ahí resulta la

ecuación $x_{n+1} = rx_n(1 - x_n)$, donde r contiene los parámetros del medio ambiente.

La levadura, por el contrario, es un caso típico de sistema continuo: su estado actual no determina directamente el de otro instante futuro, sino sólo la velocidad a la que él mismo está cambiando. Esto no se representa mediante una función iterable, como en el caso de la ecuación logística, sino mediante un sistema de ecuaciones diferenciales.

Sin embargo, la teoría de sistemas dinámicos se basa justamente en descubrir lo que tengan en común los sistemas continuos y los discretos. Incluso podríamos confirmar experimentalmente que la levadura se comporta como un sistema discreto. Si medimos a intervalos de tiempo regulares la concentración de NADH (un producto intermedio de la transformación del azúcar en alcohol) y representamos gráficamente cada nuevo valor medido en función del anterior (x_{n+1} contra x_n), los puntos se ajustan a una curva que se parece a la parábola invertida de la ecuación logística.

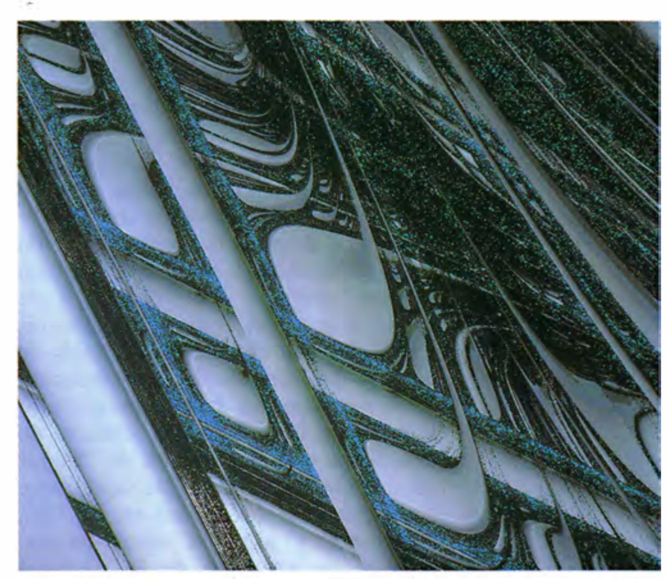
En general puede concebirse el estado de un sistema dinámico como un punto en un espacio abstracto. Este espacio puede tener muchas dimensiones, pero suele poderse recuperar lo esencial del sistema reduciéndolo a un sistema discreto de una o dos dimensiones (en la mayoría de los casos mediante la sección de Poincaré). La ley de semejante sistema es una ecuación iterativa, que remite en cada punto al estado (punto) que tendrá el sistema en el instante siguiente. Cuando se ejecuta la ecuación, los puntos saltan como pulgas por el espacio disponible. Muchos dibujos de fractales son representaciones de este tipo de comportamiento durante largos espacios de tiempo.

El conjunto de Mandelbrot va un paso más allá y contempla en una única representación un grupo de sistemas que se diferencian entre sí por el valor numérico de un parámetro (al que suele denominarse r o c).

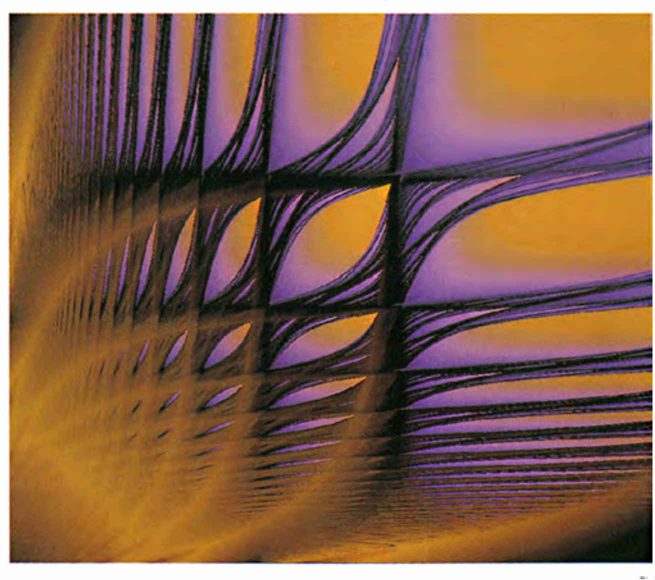
En nuestros trabajos escogí dos parámetros, A y B, para expresar las influencias del ambiente. Una región del plano (A,B) representa, pues, un amplio conjunto de ambientes imaginables. Los pares de parámetros que corresponden a los puntos de esta zona tienen un significado físico directo, como el de ser la temperatura, el aporte alimentario u otras magnitudes externas relevantes. En los dia-



6. FUNCION VI; secuencia A^7B^7; x_0 = 0,5; b = 2,36 β = 0,16; AI = 1,58 1,60; DI = 1,47 1,49; DD = 1,65 1,31. M. M. y Andreas Gasper.

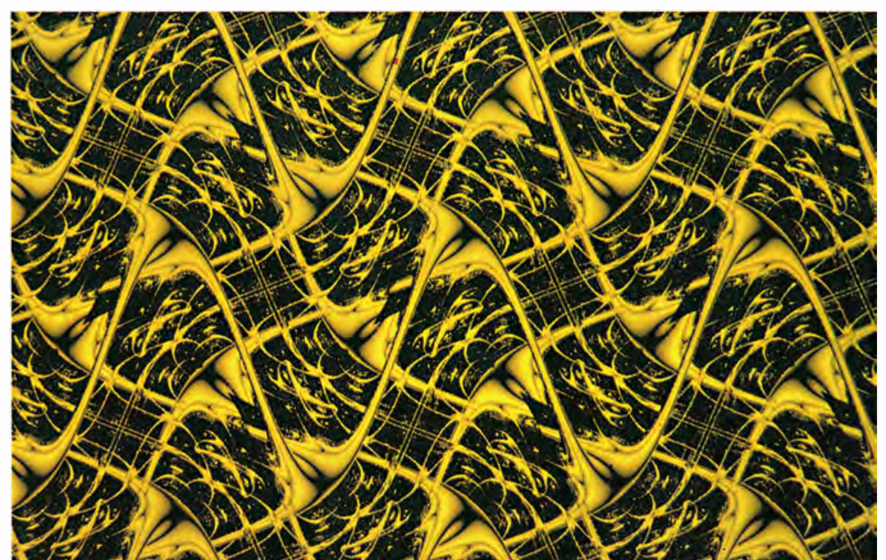


7. FUNCION III; secuencia AB; x_0 = 0,8; AI = 0,5050 0,5065; DI = 0,5050 0,5050; DD = 0,5065 0,5050. M. M. y Andreas Gasper.



8. FUNCION IV; secuencia AB; x_0 = 240; AI = 11 190; DI = 11 11; DD = 220 11. M. M. y Andreas Gasper.







9. FUNCION V; secuencia AABABAB; $x_0 = 0{,}499$; $\beta = 0{,}093$; AI = 3,8175 3,8181; AD = 3,8097 3,8181; DD = 3,8097 3,8138. M. M. y Benno Hess.

10. FUNCION II secuencia AB; $x_0 = 0$; $b = 2{,}8$; AI = 0 4,4; AD = 10 4,4; DD = 10 0,9. M. M. y Martin Allin.

11. FUNCION II; secuencia A^6B^6; $x_0 = 0$; $b = 2{,}7$; AI = 2,125 2,35; DI = 1,91 2,135; DD = 2,135 1,91. M. M. y Andreas Gasper.

gramas que reproducimos el color de un punto indica cómo se comporta el sistema en su ambiente: ya sea caóticamente (y, si es así, en qué medida) o periódicamente (y, de ser así, cuán rápida es la recuperación de una perturbación). La magnitud de caos se describe en determinadas condiciones favorables por medio de un único número, que precisamente es el exponente de Lyapunov (véase el recuadro de la página 77).

La periodicidad es sólo una forma de comportamiento no caótico. Sin embargo, para los sistemas y ámbitos paramétricos aquí contemplados es la única existente. En general también existe la cuasiperiodicidad (*véase* "Ley y orden en el universo", por Barbara Burke Hubbard y John Hubbard, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1995).

Investigación y arte: obligación y devoción

De vuelta a Alemania se me ocurrió representar gráficamente la idea de Rössler. El parámetro r debiera corresponder al aporte de azúcar, oscilando entre dos valores, A y B, pero no necesariamente mediante una simple alternancia (*ABABAB*...), sino también de formas más complicadas, como *AABAABAAB*...

Quedé sorprendido: los cambios de las secuencias de r y de los encuadres del dibujo produjeron siempre gráficos distintos y fascinantes. Las ilustraciones que acompañan a este artículo constituyen una selección de ellos.

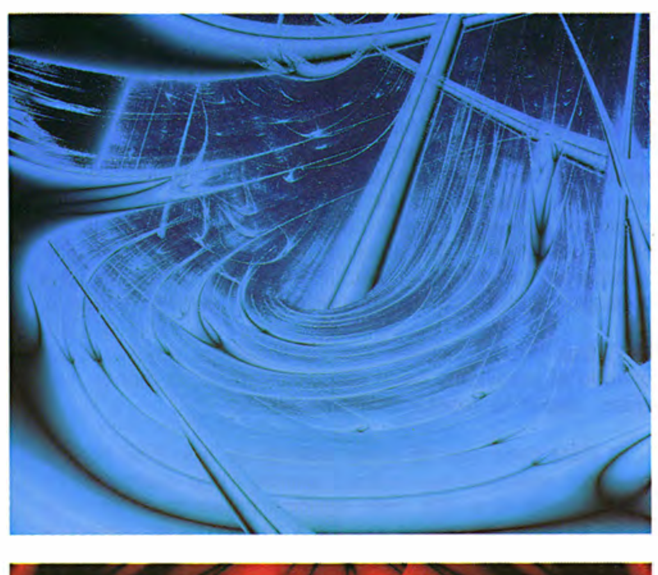
Un año después de la conversación en aquella cantina volví a Chile con algunos gráficos. Con el apoyo de IBM Chile y del Instituto Goethe organizamos una exposición. Se habló de ella en los medios de comunicación y se produjo un hecho inesperado: una asociación chilena de críticos de arte le otorgó el galardón de "Mejor exposición fotográfica" de aquel año. La siguieron exposiciones en EE.UU., Alemania y algunos otros países, además de un libro de la editorial Birkhäuser con poemas y fotografías inspirados en aquellos gráficos.

De esta manera fui adquiriendo poco a poco una doble personalidad, como investigador y como grafista. La elección de la función a iterar, de las secuencias paramétricas, del parámetro fijo, del encuadre en el plano (A,B) y de los colores permiten modificar los valores estéticos de las imágenes, igual que lo haría un fotógrafo; sin embargo, siguen siendo imágenes científicas, similares a mapas, en las que se pueden descubrir regiones caóticas (cuyo exponente de Lyapunov es $\lambda > 0$ y periódicas $\lambda < 0$, dependiendo de los parámetros de control A y B. Estas zonas se perfilan mejor si se distinguen los valores positivos y negativos de λ con colores muy contrastados. Esto hace que las figuras periódicas se destaquen en primer plano sobre un fondo caótico.

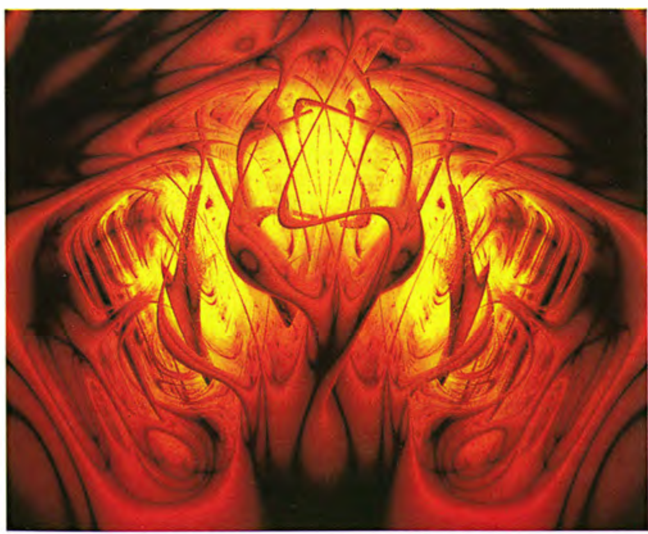
En lo que se refiere a las funciones iteradas, no hay por qué limitarse a la ecuación logística; se dispone de un surtido inagotable. Andreas Gasper, Martin Allin, Thomas Dütemeyer (estudiantes becados por la Fundación Engel de la ciudad de Marl) y yo hemos probado muchas funciones, sobre todo las relacionadas con sistemas físicos, químicos o biológicos reales (véase el recuadro de la página 76).

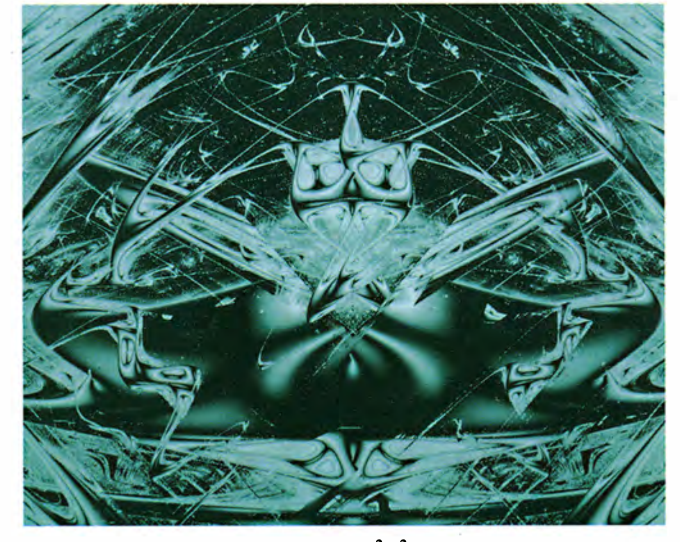
Se impone la pregunta: ¿son fractales estas figuras? La respuesta depende de lo que se entienda por fractal. Si se les define, como de costumbre, como figuras con una dimensión no entera, entonces no lo son (no son tan afiligranadas; son simplemente bidimensionales). Sin embargo, en los bordes de las figuras vuelven a encontrarse una y otra vez las mismas formas en todos los tamaños; ésta es la llamada autosemejanza, otra propiedad de los fractales. Las figuras de este tipo reciben el nombre de "fractales crasos" (*fat fractals*).

Incluso existe una medida de cuán craso sea un fractal, parecida a la que permite conocer la dimensión fractal por un proceso de recuento de cajas (*box-counting*). Dicho sucintamente, consiste en que a un fractal craso, después de restarle un interior bidimensional, aún le queda una figura de dimensión no entera. Esta dimensión sobrante toma valores de entre 1,1 y 1,7 en el caso de las









12. FUNCION I; secuencia A^5B^5; $x_0 = 0{,}5$; AI = 3,6276 3,2668; DI = 3,4384 3,1596; DD = 3,6217 2,8842. M. M. y Benno Hess. (*Superior izquierda*).

13. FUNCION VI; secuencia A^2B^2; $x_0 = 0$; $b = 1{,}9$ $\beta = 0{,}5$; AI = 1,35 1,65; DI = 1,3 1,6; DD = 1,6 1,3. M. M. y Andreas Gasper. (*Superior derecha*).

14. FUNCION II; secuencia A^6B^6; $x_0 = 0$; $b = 1{,}95$; AI = 0,9 1,82; DI = 0,24 1,16; DD = 1,16 0,24. M. M. y Martin Allin. (*Inferior izquierda*).

15. FUNCION II; secuencia A^6B^6; $x_0 = 0$; $b = 1{,}95$; AI = 1,967 0,923; DI = 2,462 0,421; DD = 3,099 1,055. M. M. y Martin Allin. (*Inferior derecha*).

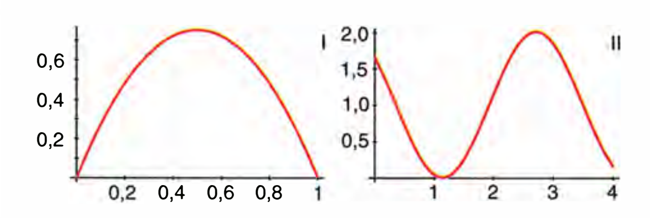
Las funciones a iterar

(I) $$f(x) = r\,x\,(1-x)$$

es la clásica ecuación logística.

(II) $$f(x) = b\ \text{sen}^2\,(x+r)$$

describe la biestabilidad óptica de cristales líquidos (según una comunicación inédita de Hao Bai-Lin de la Academia Sínica de Pekín).

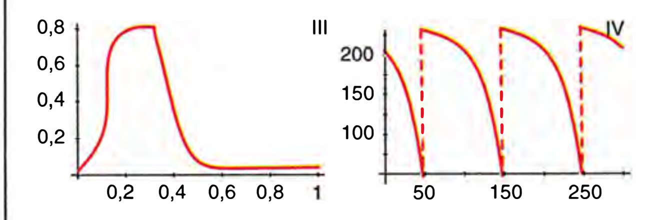


(III) $$f(x) = \begin{cases} \left(\left(x-\frac{1}{8}\right)^{1/3} + r\right)\exp(-x) + b, & \text{si } x < 0{,}3 \\ (\alpha + r\beta)\left(10x\exp\left(\frac{-10x}{3}\right)\right)^{19} + b, & \text{si } x \geq 0{,}3 \end{cases}$$

con $\alpha = 0{,}063633$, $\beta = 0{,}1137635$, $b = 0{,}023288$; describe las oscilaciones de la reacción de Belousov-Zhabotinsky (*véase* "Reacciones químicas oscilantes", por Irving R. Epstein, Kenneth Kustin, Patrick de Kepper y Miklós Orbán, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo, 1983, así como "Noise-induced order" de Kenyi Matsumoto y Ichiro Tsuda en *Journal of Statistical Physics*, volumen 31, página 87, 1983). En este caso se ha sacrificado una formulación simple (parecida a la de las ecuaciones I y II) en beneficio de una descripción cuantitativa de los resultados de laboratorio.

(IV) $$f(x) = A - B_1 \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right) - B_2 \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right)$$

con $t = kr - x$, siendo k el menor número entero para el cual $kr - x \geq t_{min}$; $t_{min} = 53{,}5$, $A = 270$, $B_1 = 2441$, $B_2 = 90{,}02$, $\tau_1 = 19{,}6$, $\tau_2 = 200{,}5$. x_n es la duración del potencial de acción del ritmo cardíaco y r el período del marcapasos que permuta entre A y B; los valores numéricos son constantes en milisegundos. La ecuación procede de Timothy Lewis y Michael Guevara, de la Universidad McGill de Montreal (Canadá); véase su artículo "Chaotic Dynamics in a Ionic Model of the Propagated Action Potential", *Journal of Theoretical Biology*, volumen 146, página 407, 1990.

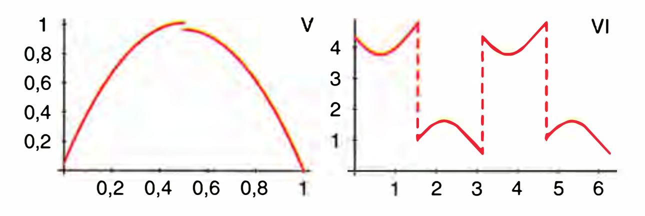


(V) $$f(x) = \begin{cases} r\,x\,|1-x|, & \text{si } x > 0{,}5 \\ r\,x\,(1-x) + \beta\,\frac{r-2}{4}, & \text{si } x \leq 0{,}5 \end{cases}$$

Esta fórmula corresponde a la ecuación logística con discontinuidad en el máximo. La teoría indica que muchas funciones iterativas, con independencia de su forma, se comportan básicamente de la misma manera caótica que la ecuación logística cuando no tienen más que un único máximo de forma parabólica. En cambio, se producen enormes variaciones de los diagramas de Lyapunov cuando se modifica la forma de este máximo, aunque sólo sea con una discontinuidad insignificante.

(VI) $$f(x) = \begin{cases} b\,\text{sen}^2\,(x+r), & \text{si } x \bmod \pi \geq \pi/2 \\ b\,\text{sen}^2\,(x+r) + \beta r & \text{en los demás casos} \end{cases}$$

Variante de la ecuación (II) con discontinuidades periódicas



El algoritmo

Los dibujos muestran una sección rectangular del plano (A,B) (no necesariamente paralela a sus ejes). El rectángulo está definido por tres cualesquiera de los cuatro puntos AI (arriba izquierda), AD (arriba derecha), DI (debajo izquierda) y DD (debajo derecha). Para cada punto (A,B) del rectángulo se analiza el comportamiento de la iteración $x_{n+1} = f(x_n)$, tomando r los valores A y B alternativamente, según el esquema elegido. El esquema AB designa la sucesión $ABABAB$..., A^2B designa $AABAABAAB$... y así sucesivamente. La programación del algoritmo necesario para conseguir gráficos como los reproducidos sería la siguiente:

1) Dos bucles asignan valores sucesivos a A y B, cubriendo el rectángulo paramétrico con mayor o menor densidad, según la resolución deseada.

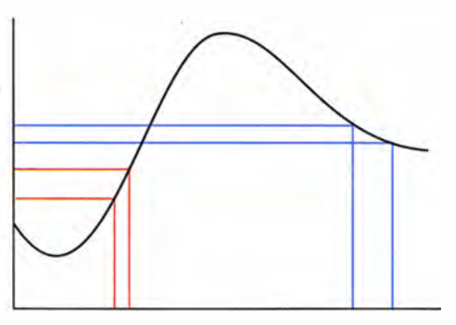
2) Para cada uno de estos valores de A y B se itera la ecuación recursiva $x_{n+1} = f(x_n)$, siendo f una cualquiera de las funciones (I) a (VI). Esto significa: partiendo de un valor inicial x_0 dado, se calcula $x_1 = f(x_0)$, $x_2 = f(x_1)$ y así sucesivamente. Además se substituye r por el valor A o B, según el esquema dado. Se realizan entre 50 y 600 iteraciones previas, según la precisión deseada, para que desaparezca la influencia de los valores iniciales. Después se determina un exponente de Lyapunov aproximado λ, para el que vuelven a calcularse de 500 a 5000 iteraciones, según la precisión deseada. Con estos valores x_n se determina la derivada $df(x_n)/dx_n$ (con el valor vigente de r) y luego se calcula el valor medio de esta segunda serie de iteraciones:

$$\lambda = m\left(\log\left|\frac{df(x_n)}{dx_n}\right|\right)$$

Si se hacen pocas iteraciones, las figuras serán poco nítidas; parecerán agujereadas o desgarradas. Se recomienda que los dos números de iteraciones que se escojan inicialmente sean relativamente pequeños; luego se podrá incrementarlos poco a poco, hasta que las imágenes aparezcan en la pantalla con la resolución deseada.

3) Se le asigna al punto del plano (A,B) un color correspondiente a su valor de λ. Por ejemplo, en la ilustración 5 se utilizó para la gama de valores negativos de λ una transición del amarillo claro (λ mínimo) al marrón oscuro ($\lambda = 0$) y para valores de λ positivos, otra del azul claro ($\lambda = 0$) al negro (λ máximo). Si sólo se dispone de blanco y negro, se recomienda el blanco para $\lambda < 0$ y el negro para $\lambda > 0$.

El exponente de Lyapunov



La utilización repetida de la función a iterar $f(x)$: $x_1 = f(x_0)$, $x_2 = f(x_1)$ etc., origina una serie de puntos x_1, x_2,... a partir de un punto inicial x_0. ¿Cuándo es caótico el sistema dinámico definido por f?

Una posible respuesta sería: el comportamiento del sistema es impredecible (caótico) cuando dos puntos que originariamente estaban muy próximos dejan de estarlo conforme avanza la iteración.

La utilización de la función iterativa agrandará la distancia entre dos puntos, o sea, aportará caos, allí donde la curva sea empinada (líneas rojas); por contra, la reducirá donde sea plana (líneas azules). No importa que crezca o que decrezca, sino sólo el valor absoluto $|f'(x)|$ de la derivada de f (pendiente de la tangente) en el punto correspondiente.

Pero la iteración puede hacer que los puntos pasen de una zona en que se intensifica el error $|f'(x)| > 1$ a otra en que se amortigua $|f'(x)| < 1$ y viceversa. A la pregunta de si la serie en su conjunto se comporta regular o caóticamente hay que responder que depende del efecto acumulado (más exactamente: del producto) de todos estos valores en el límite de infinitas iteraciones. (Tras esto se esconde la regla de la cadena de la diferenciación.) Si el producto es mayor que 1, la serie es caótica. Pequeñas desviaciones de los datos iniciales no pueden, desde luego, superar todos los límites, ya que la zona de operación del sistema dinámico es limitada; pero alcanzan el mismo orden de magnitud que el propio sistema. Un producto menor que 1 corresponde a una serie periódica.

Por razones técnicas no se calcula el producto de las derivadas, sino que, usando logaritmos, el producto se convierte en suma. Esta se divide por el número de términos de la serie, con lo que se obtiene un valor medio. El valor medio (definido por cálculo del límite) sobre toda la infinidad de términos de la serie es el exponente de Lyapunov de ésta. Valores menores que cero (que es el logaritmo de 1) corresponden al orden, valores mayores que cero al caos. Si, como sucede muchas veces, casi todas las series se dirigen hacia el mismo conjunto (el denominado atractor) después de una fase inicial, el exponente de Lyapunov caracteriza no sólo a la serie concreta, sino a todo el sistema.

imágenes de este artículo. Hicimos esta cuantificación junto con Javier Tamames, de la universidad Complutense de Madrid.

Los infinitos islotes de periodicidad, semejantes unos a otros, presentes sobre el fondo caótico incluso en las dimensiones más pequeñas, transmiten un mensaje inquietante: caos y orden pueden estar tan juntos uno de otro como se desee. La ilustración de esta página lo deja especialmente claro, como lo hacen las números 12 y 15. Las menores perturbaciones de los parámetros de control A y B pueden alterar el resultado por completo.

Es más, cada una de estas pequeñas islas contiene las denominadas curvas superestables, líneas de $\lambda = -\infty$. Si está sobre ellas, un sistema se recupera de una perturbación con infinita rapidez, mientras que justo al lado (en el mar de fondo caótico) las perturbaciones crecen exponencialmente hasta dominar totalmente el sistema.

16. FUNCION II; secuencia A^6B^6; $x_0 = 0$; $b = 2,6$; AI = 2,716 0,965; DI = 2,955 0,84; DD = 3,065 1,05. M. M. y Andreas Gasper.

Los diagramas de Lyapunov permiten localizar el caos y el orden como en un mapa. Más aún, estos dibujos resaltan las diversas magnitudes que, por así decirlo, tienen fosas de orden máximo y picos de caos. Pero hay una diferencia con los mapas geográficos, pues no siempre puede hacerse corresponder unívocamente un punto con un exponente de Lyapunov concreto; no es inusual que dos o tres ramas se encuentren una encima de otra (*véase, por ejemplo, la figura 3*). Incluso sucede a veces que con los mismos valores de A y B, según el valor inicial x_0, resulte orden o caos. Esta es una característica típica de los procesos no lineales y significa que condiciones iguales del ambiente no siempre tienen las mismas consecuencias; a veces también influye la historia previa. Además parece como si algunas ramas fuesen transparentes (*véase la figura 9*). La causa es que los valores de x_0 que corresponden a una u otra rama están encajados unos en otros de forma fractal, lo que implica que cambios mínimos de x_0 provoquen una variación drástica del comportamiento dinámico.

Deducimos de esto que los diagramas de Lyapunov no sólo muestran zonas en las que reina el caos, es decir, en las que el crecimiento rápido de pequeñas perturbaciones de las variables (por ejemplo, de la cantidad de insectos o de concentraciones bioquímicas) dificultan las predicciones hasta imposibilitarlas; también nos muestran zonas en las que pequeños cambios de los parámetros (A y B) del ambiente o de los valores iniciales (x_0) hacen variar radicalmente el comportamiento: de caótico a periódico, o a la inversa. En este caso lo que se desconoce no es sólo el valor futuro de una magnitud, sino el hecho mismo de si su comportamiento general es o no predecible.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PROPERTIES OF STRANGE ATTRACTORS IN YEAST GLYCOLYSIS. Mario Markus, Dietrich Kuschmitz y Benno Hess en *Biophysical Chemistry*, vol. 22, págs. 95-105, 1985.

MODULATED NONLINEAR PROCESSES AND A NOVEL MECHANISM TO INDUCE CHAOS. J. Rössler, M. Kiwi, B. Hess y M. Markus en *The Physical Review*, vol. 39, páginas 5954-5960, 1989.

VERKNUPFUNGEN. CHAOS UND ORDNUNG INSPIRIEREN KÜNSTLERISCHE FOTOGRAFIE UND LITERATUR. Dirigido por Horst-Joachim Hoffmann. Birkhäuser, Basilea, 1992.

FRACTAL GEOMETRY. Kenneth J. Falconer. Wiley, Nueva York, 1990.

POSTMODERNE UND NATURWISSENSCHAFTEN. Mario Markus en *Quanten, Chaos und Dämonen*. Dirigido por Klaus Mainzer y Walter Schirrmacher. BI, Mannheim, 1994.

Plásticos conductores

Las propiedades eléctricas de los polímeros conductores pueden ajustarse. Esto haría a la electrónica un poco más orgánica

Philip Yam



1. LOS BRILLANTES SEGMENTOS de este panel alfanumérico son poliméricos. Lo fabrica la empresa UNIAX Corporation, de Santa Barbara, California.

Como muchos otros progresos técnicos, el tema de los polímeros conductores comenzó por accidente. A principios de los años setenta, mientras trataba de obtener un polímero orgánico llamado poliacetileno, Hideki Shirikawa, del Instituto de Tecnología de Tokyo, se confundió y añadió mil veces más catalizador del requerido por la fórmula. Lo que obtuvo fue un película lustrosa de aspecto plateado que recordaba a una hoja de papel de aluminio, pero que se estiraba como el celofán de envolver; el producto hacía pensar más en nuevas y mejores formas de mantener frescas las sobras de alimentos que en un posible avance de la ciencia de los materiales.

Pero cuando Alan G. MacDiarmid vio aquella cosa tan insólita se preguntó si podría ser una candidata para su propósito de producir "metales sintéticos", esto es, sustancias no metálicas conductoras de la electricidad. Shirikawa, MacDiarmid y Alan J. Heeger formaron un grupo dedicado a investigar esta variante del poliacetileno en los laboratorios de la Universidad de Pennsylvania en 1977. Uno de sus descubrimientos fue que, si se añadía yodo, la conductividad del producto aumentaba varios millones de veces.

Las cualidades de flexibilidad, duración, facilidad de fabricación y bajo coste de los polímeros hicieron soñar en futuros circuitos transparentes, en músculos artificiales y en pantallas electrónicas que podrían enrollarse y llevarse bajo el brazo. Lo único que ha podido verse hasta ahora han sido diversos prototipos, entre ellos algunos componentes interesantes para pantallas y visores, como transistores y diodos fotoemisores (LEDs) de plástico. Por muy diferente que esta realidad sea de aquellos sueños, hay quienes ya predicen amplios mercados para estos productos, sobre todo recubrimientos antiestáticos, apantallamientos electromagnéticos, luces para juguetería y paneles indicadores de hornos de microondas, entre otros. Puede que parezcan aplicaciones insustanciales, pero son lo bastante prometedoras para hacer que universidades y empresas se pongan a colaborar o que sabios despistados funden nuevas compañías.

Se progresa a velocidad impresionante, pero sigue sin estar clara la repercusión comercial que vayan a tener estos productos. La probabilidad de que las empresas inviertan en nuevos equipos es pequeña si los nuevos dispositivos no son muy superiores a los actuales. Las pilas recargables de base polimérica, por ejemplo, admiten mayores períodos de almacenamiento que las habituales, pero su penetración en el mercado ha sido escasa. Las pantallas planas y los diodos fotoemisores construidos con sustancias orgánicas habrán de desplazar a los cristales líquidos y a los semiconductores inorgánicos de la sólida posición de que disfrutan, lo que no será tarea fácil.

La especialidad rebosa optimismo, pese a ello. Dado que los aparatos eléctricos y los artilugios de plástico se han convertido en parte integrante del mundo moderno, los investigadores confían en que aparecerán cuando menos algunas aplicaciones rentables de los polímeros conductores; siendo un campo comercial completamente nuevo, no sería de extrañar que se hiciesen fortunas con ellos.

Los polímeros son grandes moléculas orgánicas construidas por concatenación de unidades menores; se encuentran en los plásticos y en las fibras sintéticas que tan familiares nos resultan. Son, por lo general, aislantes, pues sus moléculas no disponen de electrones libres para transportar la corriente. Para lograr que se vuelvan conductores se recurre a una técnica bien conocida por la industria de los semiconductores: la contaminación o dopado, o sea, la adición de átomos que tienen propiedades electrónicas interesantes. En unos casos los átomos añadidos ceden sus electrones libres a los enlaces poliméricos; en otros les quitan algunos de sus electrones, lo que equivale a una aportación de cargas positivas, llamadas huecos. En todo caso la cadena polimérica se torna eléctricamente inestable y la aplicación de una diferencia de potencial obliga a los electrones a desplazarse por el polímero.

Desde los primeros tanteos con el poliacetileno se han descubierto otros tipos de polímeros que también conducen la electricidad al ser dopados, entre los que se cuentan el polipirrol, el politiofeno y la polianilina, por citar unos cuantos de los más estudiados. Aunque no se comprenden del todo los mecanismos físicos que permiten que los polímeros conduzcan, la pureza y la organización de las cadenas poliméricas parecen ser cruciales. Por ejemplo, el estiramiento del poliacetileno permite que conduzca intensidades de hasta 50.000 amperios por voltio por centímetro, en lugar de los sesenta amperios de los primeros experimentos. Algún investigador ha llegado a conseguir un poliacetileno cuya conductividad casi es la cuarta parte que la del cobre.

MacDiarmid opina que estos progresos tienen importancia general, pues muestran que el esfuerzo dedicado al perfeccionamiento de la estructura química y molecular puede desembocar en grandes mejoras de las propiedades físicas y eléctricas. También puede ajustarse el coeficiente de conductividad interviniendo en la organización estructural del polímero.

La polianilina es el material preferido en muchas aplicaciones, aunque haya otros que presentan conductividades mayores que la suya. Es uno de los polímeros orgánicos sintéticos más antiguos y se conocen bien sus propiedades. Se parece al soporte de las películas fotográficas de 35 mm, se fabrica sin dificultad, es estable en el aire y sus propiedades electrónicas pueden adaptarse fácilmente a las necesidades concretas. Lo más importante es que la polianilina es barata; de hecho es el polímero conductor más económico que existe. En fin, se adapta bien a diversas presentaciones, desde películas delgadas a superficies grabadas.

La polianilina conduce hasta unos 500 amperios por voltio por centímetro, pero no va a sustituir a los cables de cobre ni por su calidad ni por su precio, pues el cobre conduce 100.000 veces mejor y cuesta la mitad. Sus propiedades eléctricas son, sin embargo, más que adecuadas para ciertas aplicaciones. El tipo de cosas que va a reemplazar son las que resultan complicadas de fabricar, como la malla trenzada de los cables coaxiales. La malla proporciona flexibilidad al cable y permite que, por ejemplo, el de la antena de nuestro televisor sortee el sofá y llegue hasta la toma de la pared. Como el trenzado de la malla de cobre es tarea lenta y laboriosa, se está tratando de que en un solo paso se extruya la malla de polímero y se forre el cable con aislante, lo que multiplicaría por diez la velocidad de manufactura y el costo caería en picado. La universidad inglesa de Durham ha llegdo a un acuerdo en este sentido con una empresa fabricante de cables, con el compromiso de lograrlo en tres años.

Esa molesta descarga

Aunque los materiales orgánicos podrían encontrar aplicación en casi todo lo que utilice electricidad, es probable que sea la electrónica de estado sólido donde se ofrezca el mayor número de oportunidades. En este momento el mercado más prometedor está en la disipación de las cargas electrostáticas, que pueden provocar onerosos destrozos en los sistemas digitales.



Usos de los plásticos conductores

Estos son algunos de los aparatos que pudieran utilizar materiales orgánicos conductores en el futuro.

Cables coaxiales
Sus mallas trenzadas de cobre podrían reemplazarse por fundas de polianilina. Se están buscando técnicas idóneas de fabricación.

Transistores de película delgada
Estos componentes, flexibles y transparentes, podrían servir de excitadores de las actuales pantallas de matriz activa o de otras futuras enteramente plásticas.

Apantallamiento electromagnético
Incorporados a las cajas de los ordenadores, los polímeros conductores podrían bloquear las interferencias electromagnéticas de alta frecuencia.

Pantallas flexibles
Serían la meta última de la tecnología de presentación. Aprovecharían las propiedades de flexibilidad, conductividad y capacidad fotoemisora que tienen estos materiales. Pero la competencia de las pantallas de cristal líquido y el poco entusiasmo del mercado ensombrecen su futuro.

Ventanas 'listas'
Estas ventanas cambiarían automáticamente de transparencia y de color. Algunos modelos de automóviles de lujo ya las utilizan.

Soldadura
La polianilina, soluble en agua, podría reemplazar a las aleaciones de plomo, que se utilizan actualmente para soldar y que son tóxicos. No falta más que multiplicar su conductividad por diez mil.

Pilas y baterías
Como pilas de botón recargables no han tenido mucho éxito; quizá tengan más futuro como condensadores.

Los embalajes protectores actuales, basados en sales iónicas o en resinas con carga metálica o carbónica, son deficientes. La conductividad de los materiales iónicos propende a ser baja e inestable; las cargas metálicas son caras y pesadas; y el carbón conlleva el riesgo de contaminación por desprendimiento de partículas durante el embalaje. Los polímeros podrían ofrecer un manejo más sencillo y mayor capacidad de disipación de las cargas electrostáticas. Los recubrimientos de polianilina presentan la ventaja adicional de ser muy transparentes. Se espera que IBM comercialice antes de finalizar este año un producto a base de polianilina, llamado PanAquas, destinado a esta finalidad.

Las propiedades disipativas de los polímeros les hacen también ideales para el apantallamiento electromagnético. Se trata de una protección necesaria para evitar la interferencia entre las señales eléctricas que producen distintos aparatos, razón por la que las líneas aéreas insisten en que los equipos electrónicos portátiles se apaguen durante el despegue y el aterrizaje. (Este tipo de blindaje no les serviría de nada, en cambio, a quienes temen posibles efectos nocivos de las líneas de conducción de energía, porque sus campos son de frecuencia muy inferior a la que estas pantallas pueden bloquear.) Los polímeros, incorporados a las cajas de plástico de los equipos electrónicos, podrían servir de protección contra señales espurias. Los métodos de apantallado tradicionales se basan en la impregnación con partículas metálicas o de carbono, que podrían perjudicar las propiedades mecánicas del material básico en los puntos de flexión. Aunque las soluciones que utilizan polímeros son hoy por hoy más costosas que las actuales, la mezcla con otras sustancias, como el nilón, reduciría el costo.

Los polímeros podrían ser, además, poco lesivos para el medio ambiente. El PanAquas de IBM es soluble en agua (aunque ha de procesarse con disolventes orgánicos). Si pudiese aumentarse la conductividad de la polianilina, que también es hidrosoluble, podría reemplazar a los "estaños de soldar", las aleaciones de plomo utilizadas para conectar componentes electrónicos a un substrato.

El transistor totalmente plástico

Sin embargo, el logro definitivo en aplicaciones electrónicas consistiría en la fabricación completa de un componente a base de polímeros. Francis Garnier, del Laboratorio de Materiales Moleculares del CNRS en Thiais (Francia), acaba justamente de conseguirlo, utilizando técnicas ordinarias de impresión de circuitos: ha creado el primer elemento circuital enteramente polimérico, un transistor. Este transistor de película delgada, construido en torno a una molécula

de cadena corta llamada sesquitiofeno, es totalmente flexible. Sus características eléctricas no sufren variación alguna al retorcerlo, arrollarlo o doblarlo, incluso en ángulo recto.

Pero el transistor orgánico de Garnier, aunque constituye una impresionante hazaña ingenieril, no podrá hacer nada frente a los de silicio cristalino, que permiten a los electrones moverse más rápidamente. Los ordenadores construidos con transistores de plástico serían mil veces más lentos que los actuales.

Sí hay, empero, una aplicación que no requiere una enorme velocidad: las pantallas de visualización. En la actualidad se utiliza silicio amorfo para los circuitos de ese tipo (esto es, silicio en forma no cristalina) porque es mucho más económico de procesar que el cristalino y porque se presta a la deposición sobre diversos substratos; por ejemplo, sobre vidrio. El transistor de Garnier funciona más o menos a la misma velocidad que los circuitos de silicio amorfo y su descubridor estima que no será difícil conseguir el nivel de rendimiento adecuado para este uso.

Los transistores orgánicos les vendrían de perlas a los fabricantes de pantallas de cristal líquido, que son las predominantes. Se fabrican con diversas clases de compuestos orgánicos (los llamados cristrales líquidos) que se colocan entre dos láminas planas de vidrio, cuyo contorno se sella herméticamente; un tubo fluorescente las ilumina desde atrás. En las pantallas pasivas, los píxeles (celdillas que contienen los cristales líquidos) se manejan mediante tensiones eléctricas aplicadas a través de las filas y las columnas en que se ordenan. En las pantallas de matriz activa, que ofrecen mayor contraste y resolución, cada píxel está gobernado individualmente por un transistor de película delgada.

Y de ahí su costo. La pantalla multicolor de matriz activa de un ordenador portátil actual contiene cerca de un millón de píxeles. Por desgracia, basta que unos pocos funcionen mal para echar a perder toda la imagen, dada la gran sensibilidad del ojo humano, por lo que el porcentaje de paneles rechazados durante el proceso de fabricación es muy alto, lo que dispara el precio de los vendibles.

Los circuitos orgánicos serían más fáciles de construir, sobre todo en tamaños grandes. Como pueden fabricarse a temperaturas más bajas y son menos sensibles a la presencia de impurezas durante la manufactura, sus costos de producción deberían ser más reducidos. Además podrían permitir la creación de visualizadores de tipo enteramente nuevo, sintonizando las propiedades de los polímeros a cada necesidad, controlando su flexibilidad e incluso su transparencia. Con circuitos electrónicos transparentes sería posible crear pantallas de visión directa sobre parabrisas y cascos, con imágenes en posición na-



tural, eliminando la necesidad de reflejarlas en un espejo, como se hace en la actualidad.

Fulgores en la oscuridad

Los materiales orgánicos conductores no sólo podrían utilizarse en los circuitos de control, sino también como fuentes de luz de los visualizadores. La verdad es que una de sus aplicaciones más cantadas (y por ahora más inalcanzables) han sido los visualizadores robustos y ligeros. Como primer paso, empero, los investigadores apuntan hacia usos más modestos, aunque lucrativos, a saber, los diodos luminiscentes, a veces llamados LED. Estos diminutos indicadores brillantes adornan un sinfín de chismes electrónicos y representan, sólo en los Estados Unidos, un mercado de unos 400 millones de dólares, según datos de la Electronic Industries Association, correspondientes al año 1994.

En la actualidad los diodos luminiscentes se construyen mediante materiales semiconductores inorgánicos, por lo común arseniuro de galio. Se interconectan dos estratos, dopados para que posean características eléctricas diferentes, que actúan como electrodos positivo y negativo. Cuando la electricidad pasa a través de ellos, uno de los electrodos cede electrones y el otro, huecos con carga positiva (espacios que normalmente estarían ocupados por electrones). Las cargas negativas y positivas coinciden en la zona de unión, donde se combinan emitiendo luz. El color de la luz depende de las propiedades del semiconductor y del dopante; por lo general, los colores más fáciles de obtener son el rojo y el verde.

Los LED orgánicos prometen abaratar mucho la manufactura de estos dispositivos, debido sobre todo a la reducción del número de contactos e interconexiones. Para fabricar los visualizadores de los hornos de microondas, de los despertadores o de los magnetoscopios, resulta necesario agrupar muchos diodos. El tamaño de los conjuntos está limitado por el de las obleas de arseniuro de galio cristalino; las técnicas modernas no permiten tamaños diagonales superiores a los 15 centímetros. Para construir un visualizador grande es preciso, pues, montarlos y conectarlos individualmente, tarea difícil si se tiene en cuenta que una letra de tamaño razonable requiere unos 35 diodos. Las películas orgánicas, en cambio, pueden depositarse sobre extensiones prácticamente ilimitadas, aparte de que sus materias primas son más económicas que las de los diodos luminiscentes ordinarios.

El equipo que dirige Ching W. Tang en Eastman Kodak lleva mucha delantera en lo referente a diodos luminiscentes de base orgánica. (Para distinguir su técnica de las que actúan sobre polímeros mucho más largos, le han dado el poco descriptivo nombre de "minimolecular".) En 1987 Tang descubrió que podía hacerse emitir luz verde y naranja a una molécula orgánica pequeña y cristalina, la 8-hidroxi-alumino-quinolina (Alq). Desde entonces, se han encontrado maneras de que emita todos los colores del espectro, variando la capa orgánica de película delgada. Estos diodos tienen además la ventaja de que su eficiencia (medida en lúmenes por vatio) alcanza valores comparables a los de las bombillas domésticas, con duraciones diez veces mayores, superiores a las 10.000 horas. Esto permite considerar su aplicación a pantallas de equipos portátiles, aunque en el futuro inmediato no se utilizarán más que en los menos exigentes, por las limitaciones técnicas que todavía presentan.

Una primera aproximación a las de la gama alta consistiría en proporcionar la retroiluminación de las pantallas de cristal líquido. En marzo pasado, Junji Kido y sus colaboradores de la Universidad Yamagata construyeron un diodo polimérico con tres capas orgánicas diferentes (emisoras de luz roja, verde y azul, respectivamente), por lo que irradia luz blanca. La intensidad de la luz que produce y su rendimiento energético están todavía muy lejos, sin embargo, de "hacerles sombra" a las lámparas fluorescentes que ahora se utilizan.

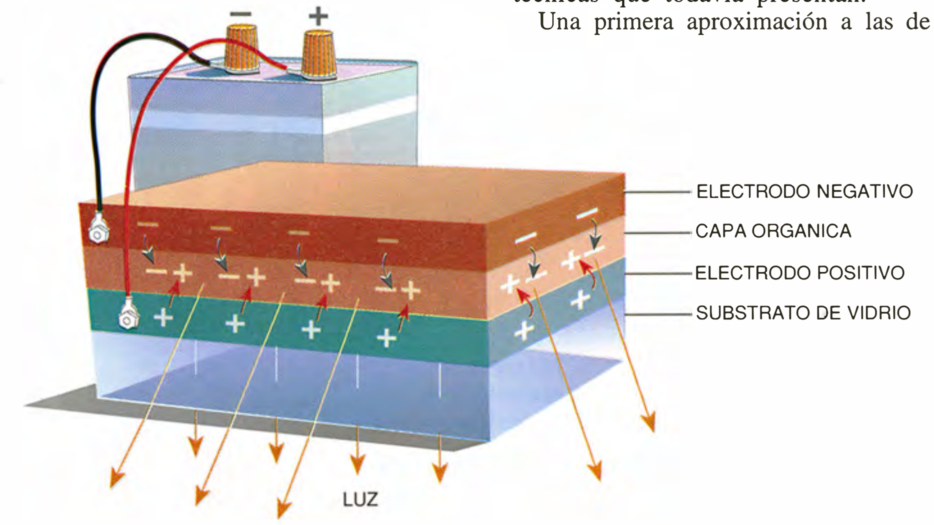
La solución para aumentar el brillo y la eficiencia podría consistir en una nueva disposición espacial. El año pasado se construyeron dispositivos electroluminiscentes en los Laboratorios Bell emparedando entre dos superficies reflectantes capas de Alq y de un material inerte. Así organizadas, las capas obedecen a la física de la cavidad de Fabry-Perot, la estructura básica de la mayoría de los láseres. La luz producida por Alq se refleja una y otra vez, proceso que la amplifica hasta que logra escapar por un extremo del dispositivo, a pesar de lo cual éste no es un auténtico láser.

El Alq emite luz de todos los colores, aunque la intensidad máxima se produce en la porción verde del espectro. Es posible que el ajuste del espesor de las capas inertes permita filtrar a voluntad las longitudes de onda y hacer que los diodos de microcavidad produzcan luz de todos los colores, e incluso blanca. Al no emitirse luz más que por uno de los extremos de la cavidad, es más la que llega al observador, pues no se dispersa en todas direcciones como en los diodos corrientes.

Este hipotético incremento de eficiencia podría aumentar también la longevidad del dispositivo. La corriente no transformada en luz se convierte en calor que hay que disipar, acelerando la destrucción del diodo. Dado que una microcavidad luminiscente exigiría menos corriente para una misma cantidad de luz, debería, al menos en principio, durar más.

Luces poliméricas

Otras líneas de investigación tratan de conseguir diodos luminiscentes a partir de polímeros, en lugar de uti-



2. UN DIODO LUMINISCENTE (LED) flexible está formado por una sustancia orgánica emparedada entre electrodos. Cuando se le aplica una diferencia de potencial se envían cargas positivas y negativas a la capa orgánica, donde se combinan emitiendo luz.

lizar moléculas orgánicas pequeñas. Los más utilizados son el poli-p-fenilen-vinileno (abreviado PPV) y sus derivados. Richard H. Friend, del Laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge, y sus asociados, descubrieron el fulgor verde-amarillo del PPV en 1990. Combinándolo con electrodos metálicos o de otros polímeros se han producido diodos luminiscentes flexibles que entregan 2,5 lúmenes por vatio. Con una excitación de 10 voltios, la luz es casi tan brillante como la de la lámpara fluorescente de una pantalla de cristal líquido. Variando la composición química del PPV, han logrado que emita la gama completa de colores.



3. LAS LAMINAS DE POLIANILINA ofrecen un aspecto rosáceo lustroso (*izquierda*) hasta que se les incorpora yodo, que, además de teñirlas de azul, las hace conductoras (*derecha*). Weigong Zheng, de la Universidad de Pennsylvania, fue quien preparó este material.

Hasta ahora, sin embargo, los diodos luminiscentes poliméricos presentan multitud de inconvenientes. El tema de la duración desempeña un papel decisivo para diferenciar la mera curiosidad del producto vendible. La mayor parte de los diodos luminiscentes fulgen solamente unos cuantos cientos de horas, cuando lo deseable serían de 2000 a 10.000. La razón principal es la falta de eficiencia, pues no convierten en luz más del cuatro por ciento de la corriente que se les envía; el resto se dilapida en forma de calor. El diodo refulge, pero el elevado voltaje necesario para conseguir tal intensidad tiene como precio el fallo precoz.

Quizá pudiera prolongarse su vida mejorando el procesamiento del PPV: ciertas reacciones indeseables pueden crear defectos en las cadenas poliméricas durante la manufactura, que luego perturban la capacidad de fulgir del diodo. Otro de los inconvenientes es su escasa longevidad; por el momento, los diodos de PPV solamente duran algunos meses, porque son inestables en el aire, reaccionando con el oxígeno y el vapor de agua.

A pesar de todo, hay compañías que tienen planes para que en el plazo de un par de años se empiecen a utilizar estos componentes en aplicaciones de poca monta, como luces de juguetes o reclamos publicitarios. La pugna entre los diodos poliméricos y los minimoleculares dista mucho de estar resuelta. Un factor a tener en cuenta es que los primeros, extraídos de disoluciones químicas, son más fáciles de fabricar que los segundos, que han de depositarse al vacío sobre un sustrato. El coste es proporcional a la facilidad de fabricación. Por otro lado, la competencia con los LED y las lámparas fluorescentes disponibles, que son baratos y perfectamente válidos, será muy dura.

Luces y sombras

¿Qué importancia tienen las posibilidades cromáticas de los materiales orgánicos? Puede que no mucha. ¿Para qué se necesitan todos los colores del arco iris si sólo nos interesa saber si el amplificador está o no encendido? O, desde otra perspectiva, ¿existe demanda real de pantallas grandes enrollables? Estas cuestiones siguen sin tener respuesta clara. Es dudoso que la gente esté ansiosa por llevar una pantalla gráfica bajo el brazo.

La experiencia justifica un cierto escepticismo. Los primeros productos comerciales que utilizaron polímeros conductores se fabricaron hace ya algunos años. Hace casi diez que las compañías japonesas Bridgestone y Seiko comercializaron una pila recargable de botón que utilizaba polianilina para uno de los electrodos y litio para el otro. Milliken and Company, fabricante textil de Carolina del Sur, puso a punto el Contex, un producto hecho con fibras sintéticas comunes mezcladas con un polímero conductor, el polipirrol. El tejido resultante era perfecto para "cegar" al radar, pues parecía que las señales no tropezaran con la tela y se perdieran en el espacio; tiene además un espectro de absorción continuo, frente al discreto que presentan las redes de camuflaje usuales, que usan fibras de carbono.

Sin embargo, las ventas de estos primeros productos resultaron decepcionantes. Aunque la pila de base polimérica tenía algunas ventajas, no eran suficientes para justificar nuevas inversiones productivas. En el caso del Contex los militares norteamericanos previeron su utilización en el bombardero A-12, que nunca llegó a construirse. Incluso los productos de mayor demanda pueden tenerlo difícil. Antes del recubrimiento antiestático PanAquas, AlliedSignal ofreció un producto similar, denominado Versacon, cuya principal diferencia consistía en que era un polvo dispersable en lugar de una disolución, de modo que quizá no fuera tan eficaz ni tan transparente. Aunque varias empresas lo utilizaron en pinturas y recubrimientos, Versacon ha dejado de fabricarse porque se vendía demasiado poco.

Lo cual no desanima a los pioneros de los polímeros conductores, ya que pueden concebirse aplicaciones extraelectrónicas. Está patentada una técnica en la que los polímeros se usan para soldar. La aplicación de polianilina en polvo entre dos piezas de plástico permite soldarlas cuando la polianilina absorbe energía de microondas.

Se han construido mecanismos electromecánicos de plástico. Determinados polímeros modifican sus dimensiones lineales al pasar corriente a su través, de forma muy parecida a las deformaciones de las láminas bimetálicas de los termostatos con el cambio de temperatura. Podrían usarse polímeros en lugar de los actuadores piezoeléctricos o electrostáticos ordinarios con menor consumo de energía. Una multitud de ellos acoplados podría funcionar a modo de un músculo artificial.

Desde luego, imaginación no falta; algunas aplicaciones inmediatas, como la disipación de cargas estáticas y el apantallado de campos electromagnéticos, parecen viables. Pero la dura competencia que plantean los dispositivos ya existentes y los problemas de demanda y comerciales pueden dar al traste con las expectativas de que cualquiera pueda llevarse al trabajo, enrollada bajo el brazo, una pantalla de plástico. El periódico tendrá que seguir cumpliendo esa función por algún tiempo.

Ciencia y empresa

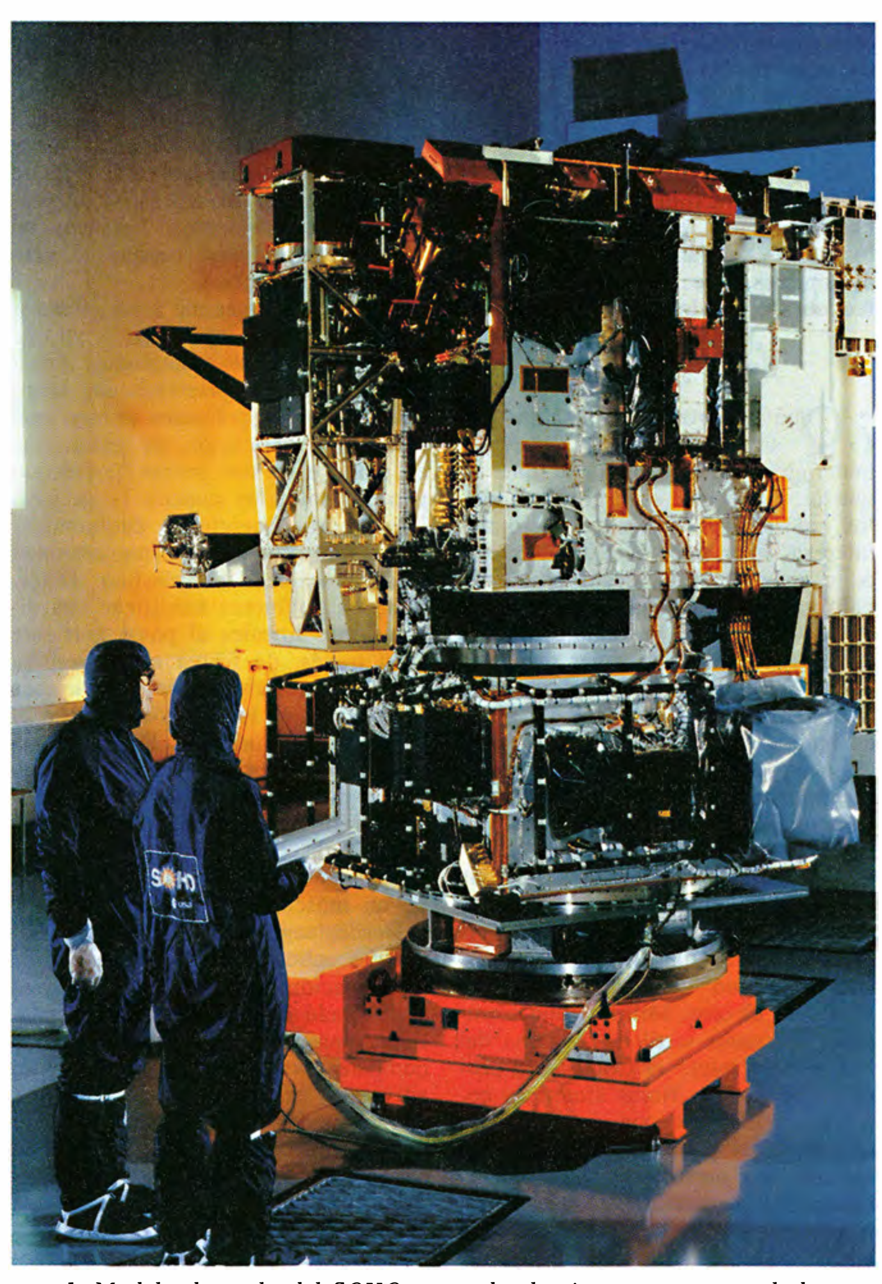
España espacial

El satélite científico "SOHO"

La fotosfera, superficie visible del Sol observada en luz blanca, es la capa del astro que emite la mayor parte de la radiación electromagnética que llega a la Tierra. También es la región mejor estudiada desde observatorios terrestres. Su intensa emisión impide obtener información directa de la estructura de las capas más internas del Sol, donde se desarrolla la generación de energía termonuclear (núcleo solar) y se opera su transporte por radiación hacia el exterior. Cerca de la superficie, el transporte se realiza por convección.

Las capas internas contienen el 99,9 % de la masa total del Sol. Para explicar su estructura, se aplican teorías físicas conocidas, con las hipótesis más simples posibles, al estado del plasma solar; es decir, los astrofísicos construyen un modelo teórico del Sol.

Por lo que respecta a la observación, la única técnica de que disponemos para comprobar este modelo es la heliosismología, que consiste en la interpretación del espectro de modos propios de vibración del Sol en términos de su estructura interna y de su dinámica. Las frecuencias de dichos modos dependen, fundamentalmente, del estado físico de las capas entre las que vibran, es decir, de su densidad, temperatura y composición química. Por otro lado, al perturbar la simetría esférica, supuesta para la estrella, cada modo puede desdoblarse, y la separación en frecuencias que se obtiene es una medida de la magnitud de la perturbación; en el caso solar, dicha perturbación es la rotación.



1. Modelo de vuelo del SOHO con todos los instrumentos acoplados

Los modos con diferente distribución espacial vibran en cavidades de distintas profundidades. Vale decir, podemos conocer los parámetros dinámicos y estructurales antes descritos en función de la distancia al centro del Sol. Por primera vez podemos medir la estructura interna solar, independientemente de la acostumbrada observación del flujo de neutrinos solares. Unidos, uno y otro enfoque contribuyen al conocimiento preciso de la estructura solar, desde su núcleo hasta la fotosfera.

Por encima de la fotosfera, la atmósfera solar es tenue y tiene una estructura compleja. La temperatura llega a un mínimo (4200 grados kelvin), para después subir lentamente a través de la cromosfera y, más deprisa, en la región de transición hacia la corona, la parte más exterior de la atmósfera solar. En la corona, la temperatura alcanza valores muy altos ($\sim 10^6$ ºK), mientras que la densidad es pequeñísima ($< 10^8$ cm^{-3}). Todas estas capas, extremadamente dinámicas, poseen una estructura compleja debido a la presencia de campos magnéticos en el plasma, que, en forma de tubos de flujo, promueven dicha complejidad.

Desde observatorios terrestres no podemos percibir esas capas. Por dos razones principales. Primera, su debilidad; son tan tenues, respecto de la fotosfera, que su emisión en luz blanca sólo puede observarse durante los eclipses y recurriendo al empleo de cronógrafos. Segunda: las rayas de emisión que se producen son muy energéticas y se dan en el ultravioleta y rayos X, región del espectro a la que nuestra atmósfera es opaca.

La nave espacial SOHO (acrónimo de la expresión inglesa que se traduce por "Observatorio Solar y Heliosférico") forma parte, junto con los satélites CLUSTER, de una doble misión científica del programa STSP (Programa de Ciencia Helio-Terrestre). Este programa, desarrollado por las agencias espaciales ESA y NASA, se propone resolver, de una forma conjunta, problemas de física solar (estructura interna, cromosfera y corona), de la heliosfera y del medio interplanetario. Componen su carga útil los aparatos necesarios para 11 experimentos, tres de los cuales son de heliosismología, seis están consagrados al estudio de la corona y cromosfera solares (SUMER, CDS, EIT, UVCS, LASCO, SWAN), uno dedicado al estudio del viento solar (CELIAS) y otro a las partículas energéticas solares (CEPAC).

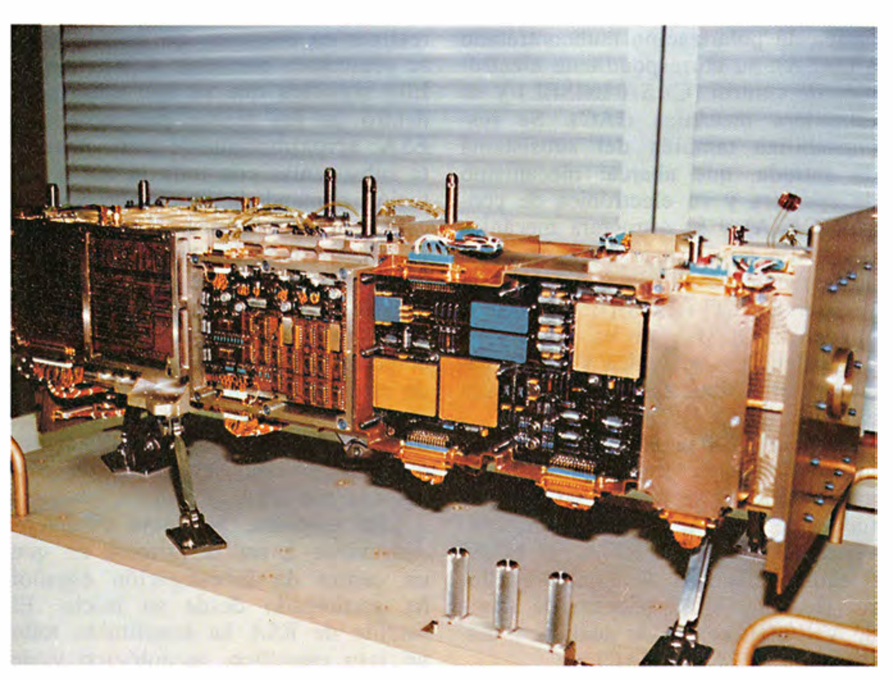
Podemos, pues, cifrar en tres apartados los objetivos científicos a que esta carga útil responde: 1) la estructura, composición química y dinámica del interior solar (heliosismología); 2) la estructura (densidad, temperatura y campos de velocidad) y dinámica de la atmósfera solar exterior: cromosfera y corona; 3) el viento solar.

Los tres experimentos heliosismológicos que forman parte del SOHO son: MDI ("Formador de imágenes Michelson Doppler"), GOLF ("Oscilaciones globales a bajas frecuencias") y VIRGO ("Variabilidad de la irradiancia y oscilaciones globales").

Veamos uno por uno. MDI se propone medir la velocidad fotosférica del disco solar, con un detector bidimensional (CCD de 1024×1024 elementos). Obtendrá principalmente el espectro de los modos-*p* (acústicos) de oscilación con estructura superficial compleja ($5<l<1000$); sondeará, pues, las capas más externas del Sol, es decir, desde un radio del 30 % del total hasta la superficie.

Se le asigna a GOLF la función de medir la velocidad fotosférica integrada sobre el disco solar, mediante espectrofotometría por dispersión (*scattering*) resonante. Extraerá el espectro de modos g (gravitatorios) a bajas frecuencias que sondean el núcleo del Sol (hasta un radio del 40 % del total) y el espectro de modos *p* de estructura superficial sencilla ($0<l<5$).

VIRGO medirá la variación en irradiancia solar con un detector simple y otro de 12 elementos; obtendrá así el espectro de modos *p* y *g* de estructura intermedia ($0<l<9$); por otro lado, al medir una magnitud diferente de la que se encarga GOLF, permitirá acometer estudios de correlación que habrán de servir para determinar las condiciones termodinámicas del plasma solar.



2. *Sensor GOLF con su configuración de vuelo*

La aportación científica española se centra, principalmente, en los experimentos de heliosismología: GOLF y VIRGO, por parte del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC); así como en el CEPAC, por parte de la Universidad de Alcalá de Henares. Estos instrumentos científicos, al igual que los demás de SOHO, son propuestos, diseñados, fabricados y probados por consorcios europeos de institutos de investigación y empresas.

En GOLF participan, además del IAC, el IAS (Instituto de Astrofísica Espacial, francés), SAp/CEA (Servicio de Astrofísica/Centro de Energía Atómica, también francés) y las universidades de Niza y Burdeos. Colaboran en VIRGO el PMOD/WRC (Centro de Radiación Mundial, suizo), IRMB (Real Instituto de Meteorología, belga) y el SSD/ESTEC (División de Ciencias espaciales/Centro Europeo de Tecnología Espacial).

En la participación española, bajo la responsabilidad del IAC, se integran las empresas CASA (con INISEL) y CRISA. La financiación ha corrido a cargo de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología para la realización de la fase de fabricación y pruebas (C/D), dentro del proyecto de "Heliosismología desde el Espacio. VIRGO y GOLF en SOHO", que comenzó en abril de 1991; aunque este programa se extiende hasta la fecha de lanzamiento (octubre 1995), se ha terminado ya el 98 % del trabajo. En él se han invertido 680 millones de pesetas.

A los experimentos GOLF y VIRGO les une un objetivo común: el servir para investigar la estructura, dinámica y composición química del interior solar por medio de la medida de las pequeñas oscilaciones globales del Sol. Difieren, sin embargo, en la técnica de observación utilizada: GOLF es un espectrofotómetro con el que medir la velocidad de las capas superficiales con una sensibilidad y precisión sin precedentes (por debajo de 1 mm/s, la velocidad de un caracol en la Tierra), mientras que VIRGO son fotómetros que miden la luminosidad del Sol con gran exactitud (por debajo de una parte entre un millón). Gracias a tales instrumentos, podremos contar con las primeras mediciones de las condiciones físicas reinantes en el núcleo solar (su densidad, su temperatura y su velocidad de rotación), donde se genera toda la energía que, una vez transportada hasta su superficie, emite al medio interplanetario y llega a la Tierra. Estas observaciones se convertirán en prueba de contrastación para calibrar los modelos de estructura y evolución, no sólo del Sol, sino de cualquier estrella; y habrán de servir de punto de apoyo para predicciones mucho más precisas (tanto hacia el futuro como hacia el pasado) de la estructura solar y estelar.

En el instrumento GOLF, el Instituto de Astrofísica de Canarias se ocupa del subsistema de polarización, que comprende: mecanismos para la

óptica de polarización (subcontratado a CASA), su correspondiente electrónica de control (CASA-INISEL) y su estructura mecánica (IAC). Se responsabiliza también del subsistema de entrada, que abarca: mecanismo de apertura y su electrónica de control (CASA) y su estructura mecánica (IAC). En tercer lugar, se hace cargo de la fuente de alimentación, un convertidor DC/DC (CRISA); y, por último, de la OGSE, esto es, del equipo de asistencia —mecánica y programación— en el segmento de operaciones en tierra (IAC).

Pero no acaban ahí las tareas del instituto canario. Dentro del experimento VIRGO se le han asignado la fuente de alimentación, a saber, convertidores DC/DC (CRISA), el EGSE o equipo eléctrico de auxilio en tierra (IAC) y VDC (Centro de datos de VIRGO), centro de análisis y distribución de datos (IAC).

De cada uno de estos subsistemas, o partes componentes de los instrumentos, han tenido que entregarse a ESA varios modelos, cada uno de los cuales ha pasado diversas pruebas de aceptación: un modelo estructural, un modelo de ingeniería, un modelo de calificación, un modelo de protovuelo y un modelo de repuesto de vuelo. Los consorcios intervinientes se han encargado de integrarlos, para formar dos instrumentos (GOLF y VIRGO), y después se han entregado a ESA para acoplarlos, junto al resto de los dispositivos.

De todos los modelos, sólo volará el penúltimo; el último es una copia exacta que se emplearía en el caso de que, en las pruebas postreras a realizar en el centro de lanzamiento, se presentara cualquier contratiempo. Ello significa que se han entregado, dentro de los plazos prefijados por ESA, aproximadamente unos cuarenta subsistemas con toda la documentación demandada, que sobrepasa el centenar de informes. Hasta el momento, los modelos de vuelo de ambos experimentos se han integrado satisfactoriamente en el módulo de carga útil del satélite. No se han detectado fallos en la construcción de estos subsistemas y el modelo de repuesto de vuelo ha pasado con éxito todas las pruebas de verificación, con los niveles de aceptación dispuestos por ESA.

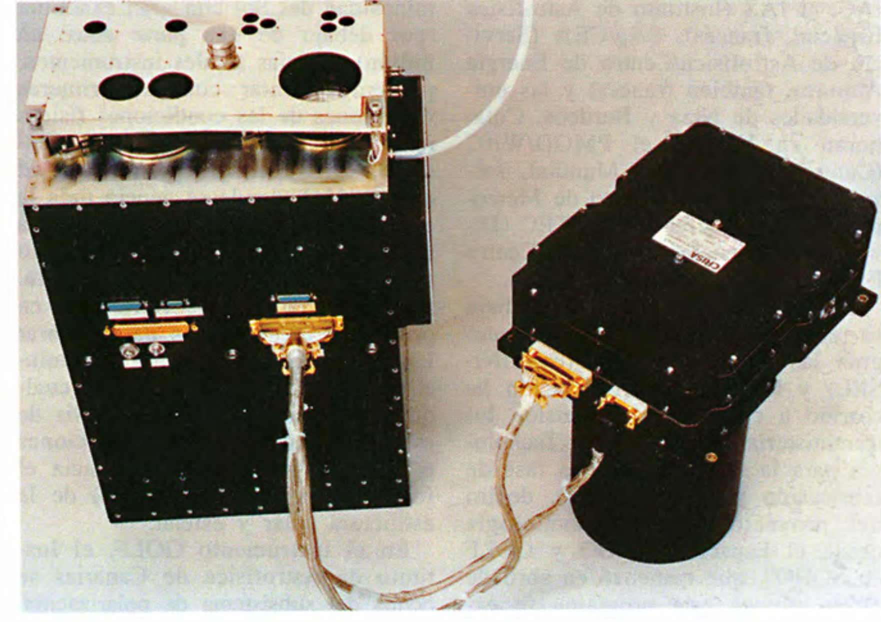
Esta empresa, de suma complejidad, viene a ser la primera en que un centro de investigación español ha participado desde su inicio. El satélite de ESA ha constituido todo un reto científico, tecnológico y de gestión, tanto para el IAC como para las industrias subcontratantes y, por supuesto, para la administración española en ciencia, tecnología y desarrollo. En este momento, se puede dar por concluida la fase industrial del proyecto.

La nave espacial SOHO se lanzará el 31 de octubre de 1995 por un Atlas-Centaur-II As, desde cabo Kennedy. La enviará primero a una órbita de estacionamiento casi circular de 180 km de altitud; de ahí se inyectará hasta una órbita de transferencia. Después de cuatro meses de crucero, y tras acometer dos correcciones principales, una inyección final del sistema propulsor de a bordo la situará en su órbita operativa, que consiste en un halo alrededor del punto L1 de seis meses de período. Este punto, en el que las fuerzas gravitatorias de la Tierra y del Sol se compensan, es ideal para la misión. Por una triple razón: tiene una velocidad relativa Sol-satélite que varía suavemente con el tiempo, apropiada para la heliosismología; está permanentemente fuera de la magnostefera, idónea para la investigación del viento solar "in situ", y permite la observación ininterrumpida del Sol.

Las operaciones de la misión SOHO se harán bajo la responsabilidad de la NASA con la aprobación de la ESA. Operaciones que se controlarán desde el Centro Goddard de Vuelos Espaciales, que posee los recursos e instalaciones requeridos. Este centro aportará todos los elementos necesarios para el control, planificación científica y de operaciones, así como para la generación de los diferentes datos científicos de la misión. El segmento de Tierra, el EOF (Instalación de Realización del Experimento) gestionará, en tiempo real, las operaciones científicas de los experimentos. El DSN (Red del Espacio Profundo) realizará las funciones de seguimiento, telemedida y telemando a través de sus estaciones terrestes en Camberra, Robledo de Chavela y Goldstone.

Con los datos en tierra, les toca el turno a los científicos, los primeros que impulsaron el proyecto, propusieron las ideas y diseñaron los requerimientos para que los instrumentos pudieran enviar medidas de extraordinario valor para el conocimiento del Sol, fuente de toda vida en nuestro planeta. Ellos son los que deberán analizar y escrutar los datos con detenimiento con el fin de cumplir con los objetivos propuestos. El grupo de heliosismología del IAC, experto en estos temas, llevará la parte más importante en esta tarea que, por supuesto, está abierta a cualquier científico español que pueda y quiera aportar ideas, así como, en una segunda fase, a cualquier científico de cualquier nacionalidad.

TEODORO ROCA
Instituto de Astrofísica de Canarias


3. Experimento VIRGO. Sensor y suministrador de energía

Aguas residuales

Tratamiento

Muchos de los residuos de la actividad humana y de la industria que le sirve acaban en el medio acuoso. La regeneración natural de dicho medio, que se produce esen-

cialmente por evaporación del agua, acompañada de reacciones y separación del resto de componentes por mecanismos geoquímicos o biológicos, no es capaz de mantener el medio en condiciones aceptables de calidad de vida actual y futura.

Para la defensa de los intereses comunes, los organismos públicos controlan los límites de impacto de vertidos (públicos o privados), y han obligado a la implantación de plantas de tratamiento de las aguas residuales, con una intensidad creciente en los últimos veinte años, y en particular en España en esta década.

La característica más general de la contaminación de las aguas residuales es su contenido en materia orgánica. Este suele medirse como la cantidad de oxígeno que se requiere o demanda para su oxidación, y que se halla entre unas décimas de kilogramo por metro cúbico de agua (aguas urbanas) hasta algunas decenas. Con frecuencia, al hablar de plantas de tratamiento de aguas residuales se suele referir a la eliminación de esta materia orgánica, enfoque que aquí seguimos, pero debemos mencionar que existen numerosos problemas específicos de tratamiento de aguas procedentes de procesos industriales, con contaminantes inorgánicos que requieren un tratamiento específico por sus propiedades fisicoquímicas.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de la materia orgánica constituyen unas de las instalaciones industriales de mayor volumen; basta con pensar que las de aguas urbanas "procesan" unas 120 toneladas métricas al año de agua residual por habitante. Estos altos caudales obligan a la utilización de métodos razonablemente sencillos al tiempo que fiables. Así, no se plantea la separación de componentes, sino que los compuestos orgánicos se consideran globalmente, y casi la única división de la que se parte es en razón de su granulometría, desde partículas con tamaño del orden de un centímetro hasta materiales disueltos.

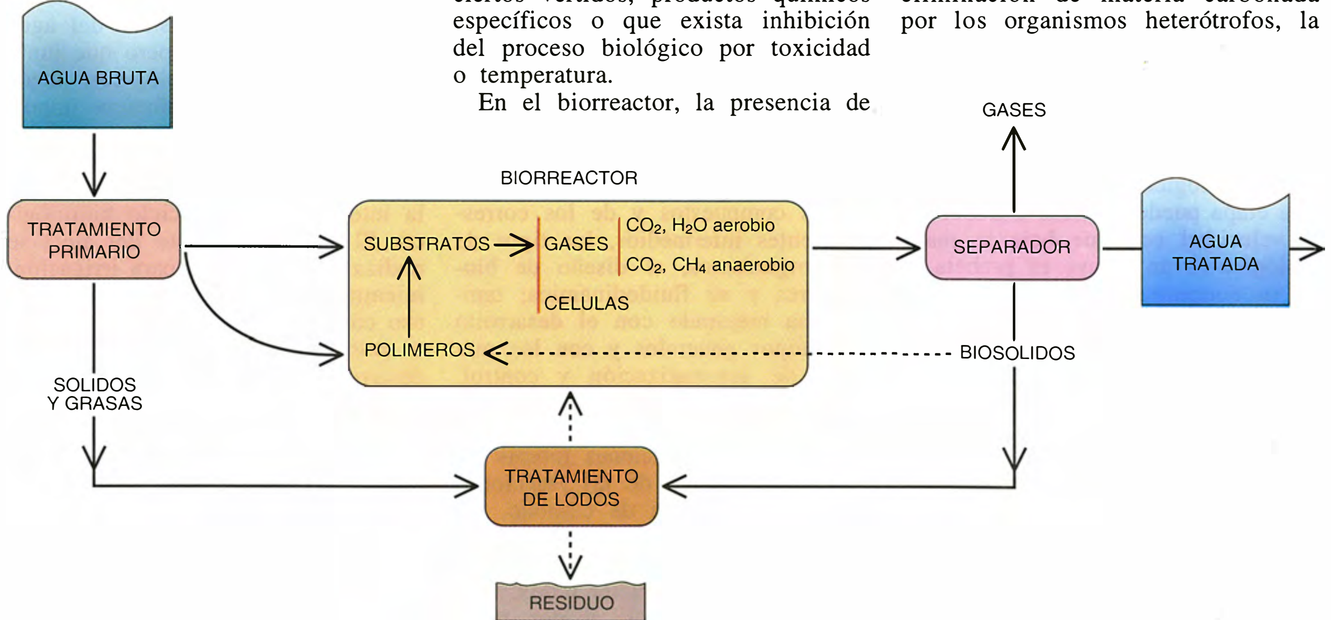
Un esquema básico de una planta de tratamiento de aguas tal como las que estamos mencionando se indica en la figura anexa. El agua residual bruta, después de un cribado y desarenado (los pretratamientos), pasa al tratamiento primario, donde se separan sólidos y grasas con tamaños alrededor de las 100 micras, o superiores. Dicha separación, que varía de forma apreciable según el tipo de agua, suele realizarse de acuerdo con su densidad y tamaño, por sedimentación, esto es, en ocasiones, también por flotación: haciendo que las burbujas de aire que se liberan de agua sobresaturada arrastren a la fase espuma los sólidos, de donde se retiran con rastrillo.

Para la eliminación de partículas orgánicas menores y materiales disueltos se suele aplicar la operación siguiente, el tratamiento biológico, que incluye un biorreactor seguido de una etapa de separación. Suele desarrollarse vía aerobia con el oxígeno del aire como oxidante (aceptor de electrones más asequible y barato). La necesidad de incorporar oxidantes por vía química queda circunscrita a ciertos vertidos, productos químicos específicos o que exista inhibición del proceso biológico por toxicidad o temperatura.

En el biorreactor, la presencia de una población bacteriana mezclada (a la que acompañan algunos protozoos e incluso organismos superiores) suministra los mecanismos enzimáticos necesarios para degradar los substratos. Estos substratos actúan como dadores de electrones, que se captan para la síntesis celular o para los diferentes procesos energéticos. Las macromoléculas, polímeros biológicos, se adsorben en los flóculos o películas biológicas, pero deben hidrolizarse antes de que penetren a través de las membranas celulares. Esta hidrólisis es con frecuencia la etapa más lenta, y por ello la que controla el proceso global; suele determinar, pues, la cinética y, por tanto, el tiempo preciso para la degradación en procesos discontinuos, o la intensidad de carga diaria en procesos continuos. El reciclado y la lisis de los biosólidos es también una fuente de biopolímeros, y limita con frecuencia la pureza del efluente.

Los substratos orgánicos (que incluyen a la propia biomasa en la respiración endógena) constituyen los dadores de electrones para organismos heterótrofos, así como el amonio (procedente de materia orgánica nitrogenada) para organismos nitrificantes. El aceptor más importante para los procesos energéticos es el oxígeno en procesos aerobios, el nitrato en denitrificación, y el carbonato en procesos anaeróbicos.

Dado que se trabaja con una población microbiana mixta, y que hay muchos tipos de substratos, las posibilidades de reacción son muchas. No obstante, junto a la tradicional eliminación de materia carbonada por los organismos heterótrofos, la



Esquema general de una planta de tratamiento de aguas residuales con el objetivo básico de la eliminación de la materia orgánica



Depuradora de aguas residuales

nitrificación que produce nitrato en medio aerobio, y la denitrificación del nitrato hasta nitrógeno en ausencia de oxígeno, son las reacciones más importantes en las plantas de tratamiento. En los últimos diez años se ha comenzado a eliminar el fósforo (previamente transformado en ortofosfato) por adsorción en organismos denominados Poli-P en fase aerobia. En dicha fase se llevan al separador las células, extrayendo el agua tratada, mientras que las células se regeneran después en fase anaerobia liberando el fosfato.

Para evitar el arrastre en el bioreactor y el escape de biomasa con el agua tratada, debe colocarse a continuación del mismo un separador, sedimentador o flotador, para toda la biomasa cuando el biorreactor funciona con flóculos (lodos activados), o para la biomasa que se desprende de las biopelículas en los biorreactores de este tipo (filtros y discos biológicos). El rendimiento de esta etapa puede seguirse a través de la velocidad con que baja la masa biológica en un ensayo en probeta, y de su concentración en la zona superior aclarada.

La separación de las células constituye, en procesos como el de los lodos activados, la fuente de mayores problemas; sobre todo, cuando se presentan organismos filamentosos en cantidades elevadas, que promueven un soporte mutuo y actúan más como estructura con cierta actividad filtrante que como biomasa separable por sedimentación. Parece claro que una forma de dominar este problema es controlar el crecimiento de estos organismos en el biorreactor.

El proceso de lodos activados, con sus numerosas variantes, es el más extendido. En plantas pequeñas se acostumbra trabajar con cargas bajas en aeración "extendida", mientras que para las grandes se introdujo en los años setenta la eliminación de nitrógeno y en los noventa la de fósforo en España. Abundan también los biodiscos en plantas pequeñas y los filtros biológicos en grandes. Por su coste y por el destino final del residuo, el tratamiento de lodos constituye un grave problema, en el que están implicados procesos de estabilización y deshidratación desde el 1-3 % de contenido en sólidos hasta, por ejemplo, el 40 % en filtración o hasta su incineración.

Quizá la característica fundamental de las plantas de tratamiento hasta hace unos 20 años era el carácter homogéneo y conservador en los diseños. Esta concepción se ha modificado algo conforme se ha avanzado en el conocimiento de las reacciones de los compuestos y de los correspondientes intermedios, los tipos de microorganismos, el diseño de bioreactores y su fluidodinámica; también ha mejorado con el desarrollo de equipos generales y con los métodos de automatización y control. Se indican a continuación algunas tendencias o cambios que pueden configurar modificaciones futuras.

El conocimiento de las reacciones para la eliminación de carbono, nitrógeno y fósforo ha promovido que el biorreactor se desdoble en varios, cada uno con su carácter redox, cortocircuitos y reciclos, y por tanto reactores de alimentación distribuida con reciclos. Se están poniendo en marcha reactores secuenciales con ciclos de reacción y separación. El desarrollo en esta área, en franco progreso, posibilita la adaptación multifuncional de los reactores.

Una tendencia, a partir del mejor conocimiento de los procesos, es la posibilidad de adaptar mejor el tratamiento al residuo específico que llega. Así se pueden señalar procesos más apropiados para cada industria, al tiempo que se procura el ahorro económico en la operación con la mayor fiabilidad posible en las plantas urbanas estandarizadas.

La multifuncionalidad y la integración de sistemas puede facilitar la flexibilidad de las instalaciones y algún ahorro económico. Así, las tres etapas del tratamiento primario, bioreactor y separación se integran en alguno de los procesos (Flocon) propuestos más recientemente.

Gracias a un mejor conocimiento de la fluidodinámica y diseño de biorreactores se han refinado las formas de flujo y el tipo de mezcla. Se han adaptado plantas viejas a esquemas de flujo más adecuados a partir del conocimiento de las reacciones. Después se han promovido nuevos tipos de biorreactores, en algunos casos ensayados en el campo químico o en cultivos puros.

La automatización ha crecido no sólo a partir de la extensión de los procedimientos, sino también por el propio conocimiento del proceso de tratamiento y la evolución de algunos métodos de análisis, de carbono, de consumo de oxígeno, etc. Asimismo se ha ido disminuyendo el peso de la mano de obra, y transfiriendo labores de mantenimiento.

La mejora en la gestión del agua es un aspecto global, pero que junto a los desarrollos tecnológicos, puede conseguir ahorros económicos importantes, además de una mayor integración del ciclo. El mayor conocimiento del medio puede promover también la integración en el ciclo hidrológico. El aprovechamiento del agua se realiza esencialmente para irrigación, mientras que el del lodo, salvo el uso como fertilizante en casos donde es posible un buen control, no está desarrollado, constituyendo una carga las opciones de deposición o de incineración. El aprovechamiento específico de determinados productos del residuo no parece tener peso cara a los próximos años.

MARIO DÍAZ,
ANTONIO GUTIÉRREZ
Y AURORA FERNÁNDEZ
Dpto. de Ingeniería Química.
Universidad de Oviedo

Hidratos de carbono

Nuevos fármacos

Las células, como las píldoras, están cubiertas de azúcar. Diríase que ese dulce revestimiento atrae a los microbios, que suelen adherirse a la membrana externa celular. En los últimos años, los investigadores han caído en la cuenta de que tal característica opera una función principal en múltiples procesos. Por citar sólo dos: la inflamación y el rechazo de trasplantes de órganos. Nada tiene, pues, de extraño, que la industria farmacéutica se haya aplicado a la fabricación de medicinas cuyo objetivo sean las proteínas de superficie que se enlazan a los azúcares.

Difíciles de analizar, los azúcares, que suelen concatenarse en oligosacáridos, han ido siempre por detrás de las proteínas en la investigación médica. Piénsese que moléculas de azúcar, por ejemplo, pueden enlazarse de 22 maneras. Con el advenimiento de los equipos automatizados, la tarea analítica ha progresado mucho, y los nuevos métodos de síntesis permiten esperar un notable desarrollo de este campo. Ole Hindsgaul, de la Universidad de Alberta, experto mundial en hidratos de carbono, y crítico ante las exageradas pretensiones de la biotecnología, no duda en afirmar que esa parte de la química tiene un futuro prometedor.

Para empezar, se percibe interés comercial en cierta reacción del azúcar que interviene en el proceso inflamatorio. Los leucocitos de la sangre quedan atrapados cuando los tejidos dañados producen selectinas, proteínas que se adhieren a oligosacáridos de cuatro azúcares que hay en la superficie de los leucocitos. Si se impidiera esa adherencia, razónase, se evitaría la acumulación excesiva de glóbulos blancos y la inflamación resultante.

Cytel, de San Diego, va por delante de cuantas empresas trabajan en esa dirección. Ha sintetizado una molécula modificada de azúcar que remeda a los oligosacáridos a los que se enlazan las selectinas. Ha creado, pues, un señuelo. Las selectinas podrían así anclarse en el fármaco, y no en los leucocitos. El compuesto de Cytel se encuentra ya en fase de ensayo experimental en pacientes para comprobar si consigue evitar lesiones de reperfusión, inflamación que suele presentar tras haber restablecido el flujo de sangre en una víctima de ataque cardíaco.

Otra empresa californiana, Glycomed, de Alameda, tiene también lo que Hindsgaul considera "una excelente clase" de inhibidores de la selectina. En su laboratorio se están investigando los hidratos de carbono que bloquean el crecimiento de vasos sanguíneos, así como los que degradan las enzimas que las células tumorales necesitan para propagarse.

Conscientes de la importancia de los azúcares de la superficie celular para las bacterias, algunos fabricantes están examinando el potencial antiinfeccioso de los carbohidratos. Neose Pharmaceuticals, de Horsham, Pennsylvania, trabaja ahora en un oligosacárido supresor de las infecciones de las helicobacterias en el estómago, que pueden desembocar en ulceraciones. La bacteria, según Neose, se prenderá al fármaco, no a los azúcares. Y la empresa está experimentando también con un azúcar que conferirá a las leches infantiles algunas de las propiedades antiinfecciosas de la leche materna. Más ambicioso es su proyecto de bloquear la reacción inmunitaria basada en azúcares, reacción que imposibilita el trasplante de órganos procedentes de mandriles y otros primates a las personas.

Algunos compuestos podrían incluso reforzar la capacidad de lucha antimicrobiana de las células. AlphaBeta, de Worcester, Massachusetts, fabrica una molécula multiazucarada que parece impedir las infecciones postoperatorias.

Mientras que la mayoría de los investigadores en este campo en expansión fían en enzimas naturales o fabricadas para construir sus moléculas azucaradas, alguno prefiere optar por una senda diferente. Daniel Kahne, de Transcell en Princeton, dice haber desarrollado una nueva técnica de síntesis química de oligosacáridos. Este proceso podría producir compuestos inéditos en la naturaleza. Puesto que muchos antibióticos y agentes antitumorales contienen azúcar en su estructura, las nuevas variantes podrían mejorar la eficacia de tales medicamentos.

Mediante nuevas formas de enlazar carbohidratos a moléculas biológicas, Transcell ha fabricado intensificadores de permeabilidad, que transportan fármacos a través de las membranas celulares. Crea incluso macromoléculas susceptibles de administración oral. "Tenemos pruebas sólidas de la viabilidad de la administración oral de proteínas y péptidos a perros", afirma Elizabeth E. Tallett, de Transcell. Las pruebas clínicas de un antibiótico de permeabilidad intensificada podrían comenzar dentro de un año.

Pese a todos los avances, sobre las medicinas que tienen por componente básico los glúcidos pende una amenaza potencial: su fácil digestión podría desaconsejar la administración en píldoras. Por eso, la inglesa Oxford GlycoSystems se afana en busca de moléculas más robustas que imiten a los oligosacáridos. La compañía ha encontrado ya un candidato prometedor, un compuesto que podría atraer los medicamentos antitumorales hacia el hígado enlazándolos con los hepatocitos. No está sola. Otros laboratorios investigan, asimismo, en compuestos miméticos.

TIM BEARDSLEY



Los pacientes de ataque cardíaco podrían recibir un nuevo fármaco, hecho de azúcares, capaz de evitar la inflamación

Libros

Hacia ninguna parte

Joseph I. Silk

Frank J. Tipler: **The physics of immortality: Modern cosmology, God, and the resurrection of the dead**. Doubleday. Nueva York, 1994.

La línea divisoria entre la ciencia y la ficción científica es increíblemente tenue. Podría esperarse que los científicos reforzasen la frontera por su lado, pero una serie de libros recientes parecen indicar lo contrario. No hace mucho que Kip Thorne publicaba *Black Holes and Time Warps* para, a través de la teoría de la relatividad, aventurarse por los procelosos ámbitos de las máquinas del tiempo. Ahora le toca el turno a Frank J. Tipler, profesor de física matemática de la universidad de Tulane, que, en el libro que comentamos, hace todo lo posible para meter a la relatividad en la iglesia.

La utilización que hace Tipler de la cosmología de la gran explosión para demostrar la existencia de Dios y, en concreto, la de un Dios amoroso que nos resucitará a todos para que vivamos una vida eterna, nos aleja de la seriedad científica mucho más que en el caso de Thorne. Tipler piensa que la teología no es más que una subdisciplina de la física y que Dios es lo que él define como el Punto Omega: el punto final de nuestro universo, cuando la gran contracción futura proporcione una fuente inagotable de energía (resultado de la liberación de energía gravitatoria producida por el colapso del cosmos). Provisto de esta energía y de la correspondiente capacidad de almacenar información, un superordenador del futuro —también llamado Dios— conseguirá una potencia ilimitada, hará resucitar a los muertos e impartirá toda suerte de venturas a la humanidad.

La mayoría de los cosmólogos no dudarían en acusar a Tipler del crimen más nefando: la comisión de un fraude de enormes proporciones. Pero el público lector parece dispuesto a aceptar su teología y se da el caso de que un eminente teólogo alemán, Wolfhart Pannenberg, ha salido en su defensa.

Tipler termina su libro con muchas páginas de notas matemáticas para darle un barniz erudito y un aura casi impenetrable. Según pretende demostrar, la inmortalidad es una consecuencia inevitable de las teorías de la relatividad general y de los cuanta. Cuando Tipler empieza a utilizar la física para probar la existencia de Dios, el científico abandona. Pero ¿es acaso más insidioso enredarse con Dios que ponderar los viajes por el tiempo? ¿Cuál es el error de Tipler, en caso de que sea culpable del crimen imputado?



Dios preside el universo ptolemaico, según la Biblia de Lutero

Ya ha habido otros investigadores que han preparado al personal que anda en busca de la divinidad. Físicos más prominentes que Tipler han equiparado a Dios con entidades tan fundamentales como un conjunto de ecuaciones o con el bosón de Higgs, partícula aún por descubrir. Los países europeos están dedicando miles de millones de dólares al Gran Colisionador de hadrones, que servirá para tal búsqueda. Los físicos de partículas revolotean como polillas alrededor de una llama en torno a las "teorías de todo", cuya finalidad es explicar la mismísima base de la existencia.

Hasta los cosmólogos experimentales han echado su cuarto a espadas teológico. George Smoot, director del grupo que descubrió las fluctuaciones del fondo cósmico de microondas, se refirió al acontecimiento como la contemplación de "la faz de Dios". Paul Davies, que nunca va muy a la zaga de la avanzadilla cosmológica, ya ha escrito dos libros en los que identifica a Dios con un cosmólogo cuántico. Para no ser menos, Stephen W. Hawking ha declarado a Dios innecesario. Como, según él, el universo no tiene límites espaciotemporales, el creador divino es superfluo.

Tipler sigue una vía propia y muy diferente, que le lleva a territorios ignotos, infinitamente más distantes que los transitados por Davies, Hawking y demás colegas. Así, por ejemplo, la teología de Tipler no se ocupa sólo de la estructura cósmica, sino también de la sexualidad humana. Gracias al Punto Omega, "será posible que cada varón se empareje no sólo con la hembra más hermosa del mundo, ni con la más hermosa que jamás haya existido, sino... con la más hermosa cuya existen-

cia sea lógicamente posible." Durante este proceso nuestros cuerpos adquirirán las características más deseables y los amores no correspondidos serán sin duda correspondidos. Tan estupefaciente visión resulta directamente, según se nos dice, de la aplicación de la teoría de la relatividad general de Einstein.

Las descaradas afirmaciones de Tipler obligan a preguntarse hasta dónde puede acompañarnos la ciencia en la búsqueda inmemorial de una deidad omnipotente y omnisciente. La física está lejos de abordar la conciencia. A los biólogos les parece ridícula la idea de que la gravedad cuántica pueda proporcionar las claves del origen de la vida o de su evolución. Y, sin embargo, Tipler considera que un superordenador futuro hará resucitar a toda la humanidad, con los recuerdos apasionados, las ideas de belleza, los sueños y los deseos de cada uno de nostros. Aun aceptando que uno haya de ser flexible respecto de las características que puedan tener las supermáquinas de dentro de miles de millones de años, realmente no me puedo creer lo que describe Tipler.

Mi confianza en sus predicciones de altos vuelos no se ve reforzada en lo más mínimo por los grandes fallos de sus asertos más mundanos. Considérese, por ejemplo, su afirmación, repetida en este libro, de que no puede haber vida en otras partes del universo porque, si la hubiera, ya se habrían encontrado artefactos de otras civilizaciones en el sistema solar. Esta falaz argumentación ignora la gran probabilidad de que cualquier civilización avanzada, capaz de colonizar nuestra galaxia, no hubiese decidido camuflarse para dar esquinazo a todos los terrícolas mentecatos que pudiese encontrar.

La afirmación de que nuestro destino en un universo que se contrae consiste en que se abran las puertas del cielo es igualmente deficiente, por la sencilla razón de que, cuando el universo tenía un minuto de edad, era tan caliente y tan denso como el centro del Sol. El notable éxito que ha tenido la teoría de la gran explosión a la hora de predecir las concentraciones de elementos químicos ligeros, que fueron los sintetizados en los primeros minutos, nos permite estar bastante seguros de que esta última descripción es correcta. Si el universo, en un futuro remoto, terminara por colapsarse, retornaría a un estado semejante de densidad y calor, donde no parece que haya mucho sitio para superordenadores ni para cualquier otro tipo de ser. Y puede que los juegos eróticos no fuesen tan divertidos a cien millones de grados kelvin. Se diría que Tipler nos ha construido el infierno en vez del cielo.

¿Es posible que crea de verdad lo que escribe? ¿O se ha convertido en el Don Quijote de la física moderna y alancea molinos de viento imaginarios? Incluso estas preguntas casi carecen de sentido, pues ilustres predecesores suyos han presentado hipótesis cosmológicas en las que decían no creer. El verdadero crimen de Tipler es haber prostituido la física poniéndola al nivel de una secta religiosa.

Esta actitud populachera le hace un flaco servicio a la ciencia, aunque puede que favorezca la venta de libros. Ya que no los teólogos, los filósofos se sentirán ofendidos. El reduccionismo ya no funciona, ni siquiera en física, y la física no llega siquiera a arañar las profundidades y complejidades de las estructuras biológicas. La vida parece requerir bastante más que unas cuantas ecuaciones. Me atrevería a decir que puede que haya tantos misterios en las inciertas fronteras de las transiciones de fase críticas como en los sistemas físicos susceptibles de cómputo algorítmico. La comprensión de todas las complejidades de la naturaleza obliga a ir más allá de la física.

Hay buenas razones para que la física naciese como filosofía natural y conserve este carácter en algunos círculos. La física y la filosofía se enriquecen mutuamente manteniendo una relación que merece ser más que el mero recuerdo de las pesquisas de aficionados pretéritos. ¿Por qué habrían los físicos actuales de preocuparse en lo más mínimo por los temas filosóficos? En mi opinión, para considerar la ciencia en la perspectiva adecuada, algo que Tipler no hace.

Físicos veteranos y de renombre han solido volver sus pensamientos hacia la religión. Steven Weinberg ha escito que "cuanto más comprensible parece el universo, tanto menos sentido parece tener", contradiciendo la filosofía más optimista de Einstein de que "Dios es sutil, pero no malicioso", que muchos científicos comparten. Davies insiste en que "la ciencia ofrece una vía más segura que la religión hacia Dios". Y Hawking nos ofrece sus fantasías: "Entonces todos, filósofos, científicos y gente corriente, participaremos en las discusiones de por qué existe el universo y existimos nosotros. Si encontrásemos la respuesta, sería el triunfo final de la razón humana, pues entonces habríamos penetrado en la mente de Dios."

Tales ideas son complementos, no sustitutos, de la teología. Tipler, por el contrario, lleva la búsqueda de una ciencia de Dios a extremos ridículos. La verdadera sabiduría que la física moderna puede ofrecer respecto de los misterios últimos y persistentes es la humildad.

La mente de la materia

David J. Chalmers

Roger Penrose: **SHADOWS OF THE MIND: A SEARCH FOR THE MISSING SCIENCE OF CONSCIOUSNESS**. Oxford University Press, 1994.

¿Cuáles son los problemas más importantes que la ciencia del siglo XX tiene pendientes de resolver? Aunque diferentes personas darían respuestas muy diversas, puede que coincidieran en las siguientes: ¿terminarán siendo los ordenadores tan inteligentes como las personas? ¿cómo puede entenderse la realidad subyacente a la mecánica cuántica? ¿cuál es la base física de la conciencia? El físico y matemático británico Roger Penrose propone en su último libro que todas estas preguntas están íntimamente relacionadas y, con notable osadía, se ocupa de todas a la vez.

Shadows of the Mind contiene versiones más concretas y detalladas de los razonamientos que Penrose avanzó en su libro *La nueva mente del emperador* en 1989. Su idea fundamental es la de que el pensamiento de los seres humanos puede hacer cosas que un ordenador no podrá hacer nunca. Basa su argumentación sobre el teorema de Gödel, según el cual todo sistema formal consistente que abarque la aritmética será incapaz de demostrar al menos una proposición verdadera, la "proposición de Gödel". (Un sistema formal es un conjunto de reglas lógicas o de cómputo; se le llama consistente si no origina nunca enunciados contradictorios.) A pesar de lo cual los seres humanos pueden darse cuenta de que tal proposición es verdadera, cosa que Penrose, y muchos otros antes que él, toma por signo evidente de que nuestra mente tiene capacidades que superan las de cualquier sistema formal.

La respuesta más sencilla es decir que tampoco los seres humanos se dan siempre cuenta de la verdad de enunciados de Gödel arbitrarios. En

términos de lógica, no podemos percibir la verdad del enunciado de Gödel de un sistema salvo que podamos determinar primero la consistencia del sistema. No hay ninguna razón para pensar que podamos hacer esto siempre y, por tanto, los seres humanos quizá tengan las mismas limitaciones que tienen sistemas formales del tipo de los ordenadores. Puede que cada uno de nosotros sea un sistema formal complejo incapaz de determinar su propia consistencia, lo que no resultaría sorprendente en vista de la complejidad del cerebro. En tal caso, Penrose no percibiría nunca la verdad de su propio enunciado de Gödel.

Pero él tiene preparado el contraataque. Por medio de un diálogo fantástico con un robot matemático propone un razonamiento hipotético sobre lo que podría demostrar si supiese que era idéntico a determinado sistema formal, ***F***. Merced a algunos argumentos autorreferentes cautivadores, afirma que en ese caso él podría conocer la veracidad de un enunciado de Gödel que ***F*** mismo no podría demostrar nunca, aunque ***F*** conociese su propia identidad. Si esto es así, él no es entonces idéntico a ***F***. Generalizando el razonamiento, Penrose llega a la conclusión de que él no puede ser idénico a *ningún* sistema formal.

Aunque pueda parecer esotérico, este razonamiento es más sólido que el precedente. Su mayor flaqueza puede que consista en su suposición de que él puede conocer indubitablemente que es consistente, suposición que puede conducir por su cuenta a una paradoja, en cuyo caso debe retirarse, pero sin la cual el argumento falla.

De tener razón Penrose, tendría que haber algún elemento no computable en los procesos físicos del cerebro, aunque nada hay en las teorías físicas actuales que permita dar cuenta de tales procesos. Esta tensión es la que anima la estimulante segunda parte del libro, donde Penrose especula sobre el futuro de la física y su relación con la ciencia de la mente. Los capítulos se adaptan a la búsqueda que realiza Penrose de los dos ingredientes requeridos por su teoría: un elemento no computable en las leyes de la física y un mecanismo cerebral que pueda sacarle partido.

Por lo que a la física se refiere, nuestro autor centra sus esperanzas en futuras elaboraciones de la teoría de la mecánica cuántica. Al igual que muchos otros científicos y filósofos, no cree que ninguna de las teorías disponibles proporcione una descripción adecuada de la realidad mecánicocuántica. En concreto ninguna de ellas da ninguna razón convincente de por qué una función de onda cuántica (la función matemática que describe la posición y el momento de una partícula) ha de colapsar a veces a un estado discreto, como la mecánica cuántica dice que debe suceder. Rechaza la idea de que esto sólo pase a consecuencia de la observación por parte de un observador consciente, al igual que no acepta las interpretaciones exóticas que evitan la producción del colapso. En su lugar sugiere que se necesitan nuevas leyes fundamentales para explicar su ocurrencia. Y aquí es donde cree que puede encontrarse el elemento no computable.

El autor conjetura que las nuevas leyes resultarán de los esfuerzos por reconciliar la mecánica cuántica con la relatividad general. La combinación de ambas teorías en una nueva descripción de la "gravedad cuántica" lleva a la conclusión de que el espaciotiempo puede a veces montarse sobre sí mismo. El colapso de la función de onda podría ocurrir, según Penrose, cuando esta superposición resulta demasidado intensa.

Nada de esto implica que el proceso de colapso no sea computable. La única razón para pensar así deriva del razonamiento inicial sobre las facultades humanas y el teorema de Gödel. No abundan las teorías físicas que se apoyen en teorías psicológicas, pero las conjeturas de Penrose tienen mucho interés por sí mismas, aun si resultase que la no computabilidad es una serpiente de verano.



Un cerebro mecánico no llegará nunca a producir un solo pensamiento, según Penrose

Para terminar de cerrar el círculo, trata de mostrar la relevancia que estas leyes físicas no computables pudieran tener para la ciencia de la mente. Aprovechando las propuestas del anestesiólogo Stuart Hameroff, apunta a los microtúbulos, estructuras proteicas de los esqueletos de las neuronas, como receptores de los efectos de la gravedad cuántica. El tamaño de los microtúbulos es lo suficientemente pequeño para que su funcionamiento resultara afectado por efectos cuánticos pero también lo suficientemente grande para influir sobre el comportamiento de toda la neurona. De ser así, el proceso no computable del colapso cuántico dentro de un microtúbulo se ampliaría hasta convertirse en procesos macroscópicos no computables del cerebro entero.

Los datos que puedan apoyar directamente tal hipótesis resultan extraordinariamente tenues. Penrose no dice mucho sobre la forma en que la acción cuántica de un microtúbulo pudiera intervenir en el funcionamiento neuronal y no proporciona ningún dato neurobiológico que resulte esclarecido merced a esta hipótesis. Por ahora, pues, estas ideas no pasan de ser curiosas lucubraciones.

Pero ¿qué sucede con la conciencia humana, el objetivo último de Penrose? Al comienzo del libro se maravilla de que la vivencia de la conciencia pueda surgir de la actividad eléctrica del cerebro, el misterio por excelencia. Tampoco es fácil entender que surja la vida interior de la mera ejecución de un cálculo, por complejo que sea. Pero la alternativa que él propone, la de los procesos cuánticos en los microtúbulos, no parece cambiar mucho las cosas. ¿Por qué habría de surgir la conciencia de funciones de onda que colapsan en los microtúbulos? Las cogitaciones de Penrose sobre la gravedad cuántica podrían ayudar a explicar, como mucho, determinados aspectos del comportamiento humano, así nuestra capacidad de demostrar teoremas matemáticos. Pero que tal conducta vaya acompañada de una experiencia consciente sigue siendo tan sorprendente como antes. A pesar de los esfuerzos de Penrose, la ciencia de la conciencia sigue careciendo de su pieza más importante.

Serán muchos los lectores del libro a quienes no convenza su refu-

tación de la inteligencia artificial ni su pretensión de haber descifrado los secretos de la mente. Pero este libro es del tipo que siempre acierta, sea o no convincente, pues su función es provocar e incitar, cosa que logra a la perfección. No puede leerse *Shadows of the Mind* sin admirarse de los rompecabezas de que se ocupa la ciencia contemporánea ni de los recursos de la mente humana.

Parientes próximos
John Mitani

Sue Savage-Rumbaugh y Roger Lewin. **KANZI: THE APE AT THE BRINK OF THE HUMAN MIND,** John Wiley & Sons, 1994.

Cuanto más se estudia a los primates, más difícil resulta identificar los rasgos que nos diferencien de nuestros primos evolutivos. El lenguaje parece ser uno de los últimos bastiones de la unicidad humana. Pero en el libro que comentamos la primatóloga Sue Savage-Rumbaugh y el escritor Roger Lewin atacan la idea de que incluso el habla humana sea ese carácter especial.

El capítulo introductorio de *Kanzi* plantea claramente la cuestión básica: ¿existe una diferencia cualitativa entre los seres humanos y los demás animales? Las opiniones están muy polarizadas. Entre los estudiosos de las ciencias sociales abundan los partidarios de una estricta dicotomía mente-cuerpo. Aun reconociendo que la continuidad evolutiva vincula a los seres humanos con los animales en lo que a las características físicas se refiere, piensan que las experiencias mentales no se comparten del mismo modo. Es el punto de vista predominante entre los lingüistas, en buena medida por la gran influencia de Noam Chomsky, para quien el lenguaje es el atributo específicamente humano que posibilita el pensamiento consciente.

Savage-Rumbaugh se muestra partidaria de otra vía, la perspectiva evolutiva, según la cual muchos estados mentales de los animales son iguales a los nuestros. Ha abordado frontalmente la dicotomía mente-cuerpo enseñando a monos cautivos una forma de comunicación referencial parecida al lenguaje, basada en un sistema de símbolos controlados por ordenador, los lexigramas.

Este libro resume los resultados de veinte años de investigación, centrándose en estudios recientes en los que participó un bonobo, o chimpancé pigmeo, macho, llamado Kanzi. Savage-Rumbaugh se mostró inicialmente escéptica frente a las exageradas afirmaciones que se hicieron tras los primeros intentos de enseñar a los monos el lenguaje de signos. Lingüistas y psicólogos dedicaron críticas mordaces a tales estudios, insistiendo en que los sujetos estaban imitando a los investigadores en vez de producir expresiones espontáneas. Sin embargo ella fue una de las pocas personas que aceptó el reto de rediseñar el estudio del lenguaje de los monos, empezando por cuestionar algunas de las premisas subyacentes a las investigaciones previas.

La idea chomskiana de que los seres humanos se diferencian de los demás animales deriva del postulado de que nosotros poseemos un mecanismo único e innato de decodificación de la estructura sintáctica del lenguaje. El énfasis puesto en la sintaxis como clave de la capacidad lingüística humana llevó a varios investigadores a buscar facultades de producción similares en los monos. Por el contrario, Savage-Rumbaugh empezó por distinguir claramente entre la producción y la comprensión del lenguaje, insistiendo siempre en que el precursor crucial de la competencia lingüística es la comprensión de símbolos tácitos dotados de referencia. Se ha centrado, pues, en el significado que las palabras puedan tener para los monos y no en cómo las produzcan ellos.

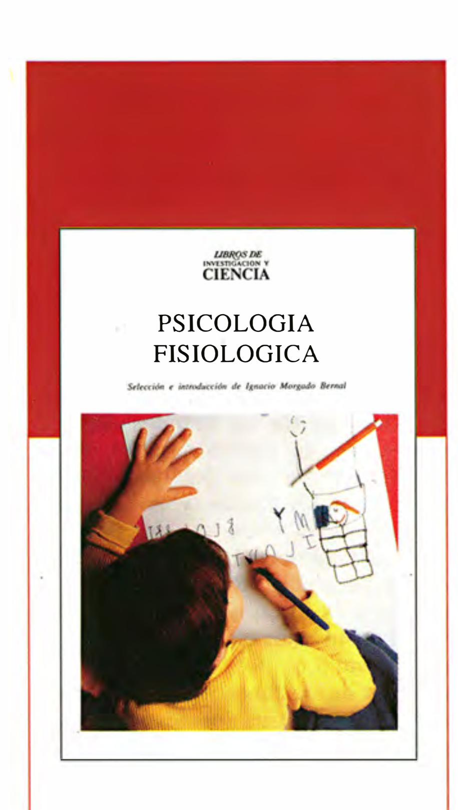
La obra describe los esfuerzos iniciales de Savage-Rumbaugh con dos chimpancés machos, Sherman y Austin. Las investigaciones pusieron de manifiesto que los chimpancés eran capaces de bastante más que la pura imitación de sus profesores, pues podían informarse unos a otros, y hacerlo por turno, mientras compartían alimentos (comportamiento muy notable, dado que en estado natural es bastante raro que se comparta). Se subrayaba así la diferencia entre producción y comprensión del lenguaje, lo que permitía pensar en que si se insistiese en este último aspecto puede que se facilitase el ulterior desarrollo lingüístico de los simios.

Se abordan a continuación las investigaciones más recientes realizadas con bonobos. Los bonobos presentan algunos hábitos sociales y sexuales poco corrientes: parecen más sociables y bastante más tranquilos que los chimpancés; también les diferencia de éstos la realización de actividades sexuales en situaciones muy variadas, entre las que se encuentra el reparto de alimento. Savage-Rumbaugh tuvo dificultades en el adiestramiento de Matata, una bonobo hembra. Haciendo honor a su nombre en kiswahili (que significa 'problema'), Matata no consiguió aprender el sistema de lexigramas.

Matata tenía un hijo adoptivo pequeño, llamado Kanzi, que asistía a las sesiones de



Kanzi parece comprender algunas reglas sintácticas básicas, pero ¿qué pasa por su cabeza?



- DONALD O. HEBB, TEORICO DE LA MENTE, Peter M. Milner
- EL AUTISMO, Uta Frith
- MIEMBROS FANTASMA, Ronald Melzack
- FISIOLOGIA DE LA PERCEPCION, Walter J. Freeman
- LA TRAGEDIA DEL DOLOR INNECESARIO, Ronald Melzack
- UNA VENTANA ABIERTA AL CEREBRO DORMIDO, Adrian R. Morrison
- EL SIGNIFICADO DE LOS SUEÑOS, Jonathan Winson
- SEXUALIDAD ANIMAL, David Crews
- RADIOGRAFIA DE LA ADICCION, Marguerite Holloway
- EL ESTRES EN LOS ANIMALES, Robert M. Sapolsky
- NEUROBIOLOGIA DEL MIEDO, Ned H. Kalin
- ANATOMIA DE LA MEMORIA, Mortimer Mishkin y Tim Appenzeller
- PROTEINA AMILOIDEA Y ENFERMEDAD DE ALZHEIMER, Dennis J. Selkoe
- MENTE Y SIGNIFICADO EN LOS MONOS, Robert M. Seyfarth y Dorothy L. Cheney
- SIMULACION DE LESIONES CEREBRALES, Geoffrey E. Hinton, David C. Plaut y Tim Shallice
- ¿PODRIA PENSAR UNA MAQUINA?, Paul M. Churchland y Patricia Smith Churchland

adiestramiento de su madre, de forma no deliberada. Y resultó que Kanzi sí era capaz de comprender y de generar espontáneamente un número limitado de lexigramas sin ser él mismo objeto de adiestramiento específico. Este asombroso giro de los acontecimientos hizo cambiar el planteamiento: en vez someterle a sesiones de entrenamiento rigurosas, se empezó a tratar a Kanzi como a un niño pequeño, dejándole que aprendiera lo que quisiera y cuando quisiera.

El éxito de este método fue tremendo. En cuatro meses Kanzi aprendió 20 símbolos y a los 17 meses ya usaba 50, generando por su cuenta nuevas combinaciones de palabras. Sobre esta base, Savage-Rumbaugh y Patricia Greenfield investigaron si Kanzi había conseguido el santo grial del lingüista, la sintaxis. El examen detallado de las expresiones de Kanzi ha llevado a la estimulante conclusión de que posee una capacidad sintáctica rudimentaria, pareciendo ser sensible al orden de las palabras y a otras claves sintácticas.

Los métodos empleados en los estudios lingüísticos con los simios tienen una aplicación práctica para la enseñanza de hábitos comunicativos a los niños aquejados de graves retrasos mentales, que los autores consideran como una extensión lógica de su investigación con Kanzi. Esto implica que hay una semejanza de las capacidades linguísticas, lo que lleva de modo natural a que Savage-Rumbaugh reafirme la continuidad mental entre los simios y los seres humanos.

Es indudable que los resultados obtenidos con Kanzi serán muy controvertidos. Ya se han producido rechazos de la idea de que el bonobo adquiera y use espontáneamente el lenguaje. La mera cuestión sobre un verdadero "lenguaje" animal provoca reacciones tan antagónicas que uno se pregunta si podrá avanzarse algo hacia su respuesta. Serán muchos los lingüistas e investigadores de las ciencias humanas que seguirán aferrados a una postura filosófica que no les permite aceptar los postulados de Savage-Rumbaugh. Por el contrario, aumenta el número de psicólogos cognitivos y de etólogos que aplauden la aparición de estudios como éste, en los que se defiende que los animales poseen facultades cognoscitivas superiores.

¿Hay esperanza de que esto se resuelva? Si desde el comienzo se hacen suposiciones apriorísticas sobre lo que los animales pueden o no pueden hacer, la investigación científica efectivamente no puede proseguir. A falta de otros datos, parece prudente que se les planteen las preguntas a los mismos animales, siguiendo el camino abierto por Savage-Rumbaugh. También es importante que se evite sacar de quicio los resultados y que se empiece a investigar a fondo sobre los límites del conocimiento animal. Esto significaría una nueva etapa en el esclarecimiento de nuestro lugar en la naturaleza, que delinearía las semejanzas y las diferencias entre simios y humanos.

Estrellas en disco

Timothy Ferris

REDSHIFT: MULTIMEDIA ASTRONOMY. Maris Multimedia, 1993-94 (Macintosh o Windows).
ASTRONOMER. Expert Software, 1994 (Windows).
HYPERSKY. Willman-Bell, 1993 (DOS o Windows; CD-ROM de datos aparte).
BEYOND PLANET EARTH. Discovery Channel, 1993, (Windows).
JOURNEY TO THE PLANETS. Multicom Publishing, 1994 (Macintosh o Windows).

Se proclama una y otra vez que la tecnología multimedios constituye un formidable instrumento didáctico, capaz de combinar el saber de una biblioteca universitaria con el gancho de una película de Hollywood. Hasta la fecha, empero, muchos de los programas multimedios de propósito formativo han resultado, a la hora de la verdad, insulsos, superficiales y de funcionamiento errático, dando así pábulo al comentario cínico de que la tecnología CD-ROM es la tecnología del futuro... y siempre lo será. Estos cinco programas de astronomía dejan traslucir muchas de las actuales limitaciones de los multimedios. Pero también hay un par de ellos que permiten entrever los nada desdeñables recursos que así pueden ofrecerse a personas no especializadas que utilicen sus ordenadores para la exploración del cielo nocturno.

Destaca entre todos ellos *RedShift*, un versátil "planetario informático", es decir, capaz de mostrar el cielo nocturno de forma útil para la observación a simple vista o por medio de un telescopio pequeño. Hace gala asimismo de características multimedios, como la posibilidad de registrar y reproducir animaciones relaciona-

das con la astronomía y de exhibir más de 700 imágenes en color de alta resolución de planetas, nebulosas y galaxias. La vasta base de datos del disco contiene alrededor de un cuarto de millón de estrellas, unos 4000 objetos de las profundidades del espacio, 5000 asteroides y 100 cometas periódicos.

El aspecto de la pantalla de *RedShift* es casi tan imponente como los mandos de un avión 747, pero es fácil de manejar. Puede organizarse de modo que proporcione un emporio de información, sin faltar los tiempos sidéreo y solar y sistemas de coordenadas horizontales y celestes. Una función de ampliación permite llenarla de discos planetarios que muestran con exactitud elementos específicos, como las ubicaciones de los satélites de Júpiter o cuál es el hemisferio de Marte que en este momento apunta hacia la Tierra.

La fascinación de un programa planetario reside en buena medida en su capacidad para recrear el aspecto que tenía el cielo nocturno en tiempos y lugares remotos. *RedShift* lo hace de forma fácil y fiable. Hice una prueba sobre la historia referida por Fernando Colón, según la cual, su padre, Cristóbal, y él, observaron un eclipse lunar que empezó "con la salida de la Luna" durante la anochecida del 29 de febrero de 1504, como el programa confirmó con presteza. Cristóbal Colón aprovechó tal acontecimiento para aterrorizar a los nativos de Jamaica, amenazándoles con que Dios no les devolvería la Luna a menos que aprovisionasen sus vacías naves. El editor afirma, y cabe creerle, que *RedShift* es capaz de predecir las posiciones de los planetas interiores con una precisión de 30 segundos de arco en cualquier fecha comprendida entre el año 4712 a. de C. y el 10.000 de nuestra era.

La instalación de *RedShift*, como la de muchos otros programas de este tipo, puede resultar un tanto fastidiosa y forzar a los usuarios al estudio de los arcanos de los controladores (*drivers*) de vídeo y de los ajustes de configuración. Pero una vez a punto y funcionando, obsequia al observador con lujos tales como una pasmosa animación de Júpiter visto desde un punto cercano a la órbita de Io, o con vistas impresionantes de la Tierra desde la perspectiva que se desee. Los programas cartográficos que lo posibilitan, escritos en la ciudad rusa de Kaliningrado por un equipo de programadores del Control de Misiones Espaciales ruso, pueden equipararse al mejor grafismo informático disponible.

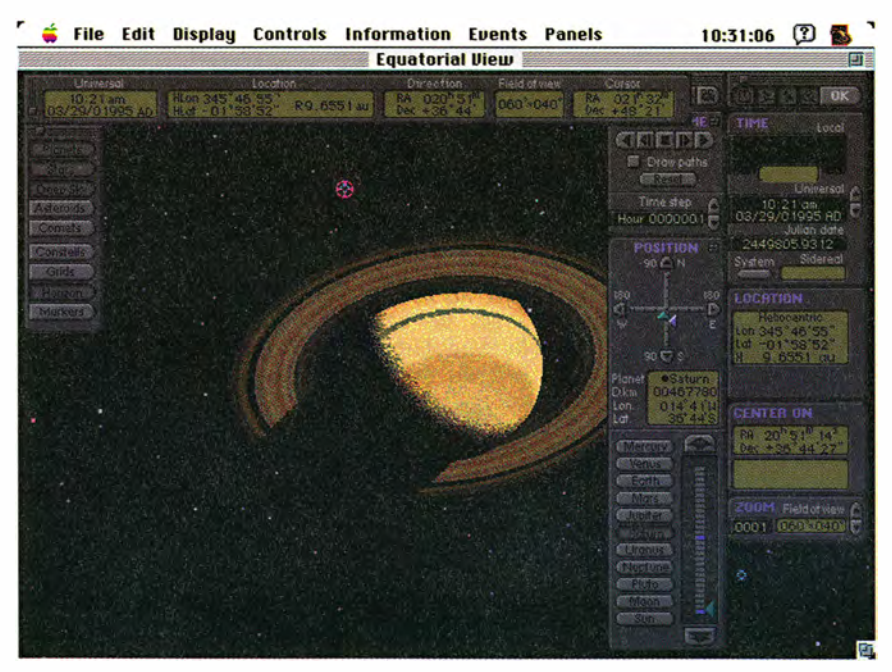
Las fotos fijas, aunque atractivas, deberían ser más abundantes y de calidad más uniforme; el texto que las acompaña debería ser más amplio y haberse revisado más cuidadosamente. Pero incluso tal como está, con algún que otro fallo, *RedShift* puede ser muy útil para estudiantes y astrónomos aficionados y para quienes sientan algo más que un interés superficial por el cielo nocturno.

Astronomer es un programa menos ambicioso. De hecho yerra en varias horas al computar el momento de la ocultación observada por Copérnico. Su presentación del cielo nocturno es también relativamente rudimentaria. Y la faceta multimedios del disco, que constituye en realidad un programa aparte, viene a ser poco más que un conjunto de transparencias digitalizadas acompañadas de un texto breve. Su bajo precio y su sencillez podrían hacerlo aconsejable para quienes no deseen habérselas con programas como *RedShift*.

El punto fuerte de *HyperSky* es la inmensa cantidad de datos "en rama" que contiene. Este disco da cabida a la totalidad de los 15 millones de estrellas recopiladas en el *Hubble Space Telescope Guide Star Catalog*, amén de más de tres millones de galaxias, nebulosas, cúmulos estelares y cuásares. Esto es unas cien veces más información que la contenida en *RedShift* y sería suficiente para llenar la biblioteca de un pequeño observatorio de tiempos predigitales. Por desgracia la interfaz de *HyperSky* es fastidiosa; la utilización imprudente del comando "Mostrar" puede hacer que incluso quienes utilicen equipos rápidos se desesperen mientras el programa va cubriendo laboriosamente la pantalla con imágenes de estrellas tan densamente apiñadas como las arenas de la playa. Ofrece, en cambio, un tesoro de información para el astrónomo profesional o el aficionado serio que sepan lo que buscan.

Beyond Planet Earth y *Journey to the Planets* sufren ambos de los inconvenientes que hacen que el término "multimedios" se haya convertido casi en sinónimo de desangeladas propuestas comerciales, más preocupadas por la apariencia que por la sustancia. Ambos discos cargan el acento en unas cuantas secuencias de vídeo llamativas, acompañadas de música sintetizada y de narraciones pretenciosas, que generan más ruido que nueces. El resto es básicamente terreno baldío ocupado con animaciones, fotos, música y palabras que, pese a toda su fanfarria, aportan menos información que un libro de texto mediocre.

Mientras se maneja superficialmente este variopinto popurrí no se puede evitar la reflexión de que la televisión y las películas, que llevan decenios haciendo cosas parecidas, no han resultado eficaces como medio de impartir conocimientos serios, aunque resulten muy atractivas. Los programadores tienen todavía un largo trecho por recorrer hasta que los multimedios sean lo que pretenden ser.



RedShift aúna gráficos impresionantes con conocimientos serios en un CD-ROM

Bloc de notas

Didier Nordon

La caza del león

¿Cómo cazar un león? Muy fácil. Se toma una jaula esférica y se la coloca en medio del desierto, que es donde viven los leones. Se mete uno en la jaula y se encierra dentro de ella. Después se efectúa una inversión, transformación geométrica que deja invariante la esfera pero convierte todo punto exterior a ella en interior. Tras la inversión, el león, que estaba fuera de la jaula, se encuentra ahora prisionero en su interior, mientras que uno está fuera de ella, libre.

Quizá no sea necesario decir que esta historia es típica del humor de que hacen gala los matemáticos, pues suelen ser sus propios miembros quienes mejor saben ridiculizar a un grupo determinado. Nada más manido que reprocharles a los matemáticos su falta de sentido práctico, pero hacía falta todo el genio de la disciplina para hacerlo mediante esta caza del león.

Sobre libros y tartas

La invención más humillante de la cultura libresca es, sin duda, el marcapáginas. Por sí solo demuestra que, cuando se vuelve al libro abandonado, uno no es capaz de distinguir las páginas leídas de las que no lo están. ¿De qué nos sirvió el esfuerzo?

Siguiendo el mismo principio, ¿no debería haberse inventado el marcatartas, objeto que permitiría distinguir al primer vistazo la parte ya comida de una tarta?

Inasible complejidad

Algunos autores se esfuerzan por elaborar una definición erudita del término "complejidad". Pero si el mundo es complejo (en el sentido habitual del término), podemos estar seguros de que se las ingeniará para ofrecernos fenómenos que escapen a toda definición de complejidad. Y si no lo es (cosa que dudo), mal viene a cuento una definición erudita de la complejidad.

Las teorías de la complejidad suscitan tanto más mis reservas cuanto que suelen ir acompañadas de un injustificado desprecio hacia el determinismo laplaciano, relegado así al rango de la creencia ingenua, que tanta ternura nos hace sentir por nuestros antepasados. ¡Esperemos que el futuro sea más leal con nosotros de lo que lo estamos siendo nosotros con Laplace! Cierto es que los progresos actuales echan por tierra la noción de determinismo; pero no por ello era simplista la concepción de Laplace. El célebre pasaje de su *Essai philosophique sur les probabilités* está en condicional: si una inteligencia fuese lo suficientemente grande, nada para ella sería incierto. Laplace se apresura a precisar que el espíritu humano "ofrece un débil esbozo de esta inteligencia", de la que permanecerá "siempre infinitamente alejado." Así pues, aunque no utilice esta palabra, Laplace tiene perfecta conciencia de la complejidad del mundo.

Un punto a subrayar

Puede subrayarse una palabra aquí y otra allá de un texto; se cambia así su entonación y su sentido. Pero subrayar frases enteras, e incluso párrafos, como hacen algunos, es muy de censurar. La causa es que este artificio no está destinado a cambiar la entonación, sino a indicar que las frases subrayadas son importantes.

¡Qué tremendo error! Incluso el más benévolo de los lectores sacaría la conclusión de que las frases no subrayadas no son importantes y pueden permanecer dormidas para siempre entre la tinta. El abuso de las frases subrayadas es un indicio casi infalible de esa catástrofe del espíritu llamada "literatura gris".

¡No subraye nunca toda una frase!

Mentiras indispensables

Un fontanero jura por todos los dioses que pasará "sin falta" antes del fin de semana: no lo hace. ¿Es un mentiroso? No. Simplemente, pone en práctica una forma específica de mala fe utilizada en su profesión. Un político declara no tener más ambición que el interés nacional; un dentista nos dice "ya está" para tranquilizarnos; un hombre de negocios pretende convencernos de que somos nosotros quienes nos llevamos el gato al agua al firmar el contrato. Pura mentira.

Sin embargo, todas estas personas pueden ser perfectamente honestas. No hacen sino comportarse según la costumbre. Cada profesión posee su forma específica y codificada de mala fe, sin la cual sería imposible llevar adelante el negocio.

Las profesiones intelectuales no se escapan a la regla. Por ejemplo, la mala fe del traductor consiste en insertar una nota al pie de página, que dice: "juego de palabras intraducible" (¿no sería posible que un traductor más diestro lo consiguiera?); la del jefe del laboratorio, en añadir su nombre a un artículo que ni siquiera ha leído; la del matemático, en decir "un sencillo cálculo demuestra que..."

Juego: complétese la lista anterior. Ojo: no se trata de estigmatizar la falta de honestidad, sino de localizar el tipo de retorsión de la verdad que en cada profesión resulta indispensable para poder ejercerla.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



RECUERDOS DE UNA GUERRA NUCLEAR, por Philip Morrison

El pasado mes de agosto se cumplieron 50 años del lanzamiento de dos bombas nucleares sobre Japón. El autor, que participó en el Proyecto Manhattan, reflexiona sobre el inicio de la era atómica y lo que podría depararnos el mundo tras el fin de la guerra fría.

LA COLISION DEL SHOEMAKER-LEVY 9 CON JUPITER, por David H. Levy, Eugene M. Shoemaker y Carolyn S. Shoemaker

Las imágenes de la colisión del cometa con Júpiter continúan ofreciendo materia de estudio a los astrónomos un año después.

LAS VIRTUDES DEL RUIDO DE FONDO, por Frank Moss y Kurt Wiesenfeld

Físicos, biólogos e ingenieros hablan mucho hoy en día del fenómeno de la resonancia estocástica, por el cual el ruido de fondo viene a reforzar las señales débiles.

LA COMUNICACION ENTRE LAS RANAS, por Peter M. Narins

En su afán de hacerse oír por rivales y parejas potenciales, los anfibios han desarrollado una plétora de complejas habilidades comunicativas.

TORNADOS, por Robert Davies-Jones

Se conoce bastante bien el desarrollo de las nubes tormentosas que degeneran en tornados, pero todavía no están resueltos todos los misterios relativos a la formación de esos violentos vórtices.

LA FISIOLOGIA DE LA DESCOMPRESION, por Richard E. Moon, Richard D. Vann y Peter B. Bennett

Hace más de un siglo que se sabe que la exposición del ser humano a presiones superiores a la normal puede producirle lesiones corporales y hasta la muerte. Se van comprendiendo poco a poco los mecanismos subyacentes.

ASI DESTRUYE EL VIRUS DEL SIDA LAS DEFENSAS INMUNITARIAS, por Martin A. Nowak y Andrew J. McMichael

Según una hipótesis verosímil, los efectos devastadores del sida sobre la inmunidad son consecuencia de que el virus evoluciona en el organismo de forma persistente y peligrosa.

DIFICULTADES EXTRACIENTIFICAS DE LA CIENCIA, por W. Wayt Gibbs

Los investigadores de la mayoría de los países del mundo se enfrentan a diversas barreras que dificultan el conocimiento de sus logros y hacen que trabajos de calidad caigan en el olvido.

